ISSN 1824-8705

Rivista Italiana di Agrometeorologia

Italian Journal of Agrometeorology

Rivista Italiana di
Agrometeorologia
anno 10 - n. 2 – luglio 2005

Periodico quadrimestrale edito dall'AIAM

Autorizzazione Tribunale di Firenze n. 5221 del 4/12/2002

Poste Italiane s.p.a. - Spedizione in Abbonamento Postale - 70% - DCB UDINE.

Rivista Italiana di Agrometeorologia
Italian Journal of Agrometeorology
Anno 10 - n. 2 – Luglio 2005

Rivista Italiana di Agrometeorologia
Periodico quadrimestrale edito dall'AIAM
www.agrometeorologia.it
ISSN 1824-8705

EDITORE:
AIAM Associazione Italiana di Agrometeorologia
Presidente: Luigi Mariani
Consiglieri: Maurizio Borin, Andrea Cicogna, Antonino Drago, Vittorio Marletto, Simone Orlandini, Miriam Rosini, Emanuele Scalcione.
Revisori dei conti: Federico Spanna, Maria Carmen Beltrano, Luigi Pasotti
Sede legale - via Caproni 8, 50144 Firenze.
Sede tecnica - via Modigliani 4, 20144 Milano

Responsabile scientifico (*Editor in Chief*) :
Maurizio Borin
e-mail: maurizio.borin@unipd.it
Segreteria di redazione:
Roberto Confalonieri
e-mail: roberto.confalonieri@jrc.it
Redazione a cura di:
Andrea Cicogna
e-mail: andrea.cicogna@csa.fvg.it
Direttore responsabile
Marco Gani
e-mail: marco.gani@csa.fvg.it

Abbonamenti
La rivista è spedita gratuitamente ai soci Aiam. La quota associativa all'AIAM per il 2005 è fissata in € 50 per i soci singoli ed in € 300 per gli enti. I versamenti possono essere effettuati sul CC postale n. 43686203 intestato ad Associazione Italiana di Agrometeorologia.
In alternativa il costo dell'abbonamento alla sola rivista è di € 60 da versare sul medesimo CC postale.

Obiettivi
La Rivista Italiana di Agrometeorologia si propone di pubblicare contributi scientifici originali, in lingua italiana ed in lingua inglese, riguardanti l'agrometerologia, intesa come scienza che studia le interazioni dei fattori meteorologici ed idrologici con l'ecosistema agricolo-forestale e con l'agricoltura intesa nel suo senso più ampio. Fra le aree tematiche di specifico interesse della rivista si segnalano: l' ecofisiologia delle piante erbacee e arboree, la fenologia delle piante coltivate, la fitopatologia, l'entomologia, la fisica del terreno e l' idrologia, la micrometeorologia, la modellistica di simu-lazione, il telerilevamento, la pianificazione territoriale, i sistemi informativi geografici e le tecniche di spazializzazione, la strumentazione di misura di grandezze fisiche e biologiche, le tecniche di validazione di dati, l'agroclimatologia, la divulgazione in agricoltura e i servizi di supporto per gli operatori agricoli.
La Rivista si avvale di un Comitato scientifico, che è il garante della qualità delle pubblicazioni e che per tale scopo può avvalersi di referee esterni

Aims
The Italian journal of agrometeorology (Rivista Italiana di Agrometeorologia) publishes English or Italian-written original papers about agrometeorology, that is the science which studies the interactions between meteorological, hydrological factors and the agro-forest ecosystem and with agriculture, including all the related themes: herbaceous and arboreal species ecophysiology, crop phenology, phytopathology, entomology, soil physics and hydrology, micrometeorology, crop modelling, remote-sensing, landscape planning, geo-graphical information system and spatialization techniques, instrumentation for physical and biological measurements, data validation techni-ques, agroclimatology, diffusion of information and support services for farmers.
Submitted articles are reviewed by two independent members of the Editorial Board or by other appropriate referees.

Comitato dei referee
(*Editorial Board)*

Presentazione del Direttore

Il n° 2/05 di RIAm, terzo fascicolo dall'uscita della rivista, costituisce un importante traguardo; anzi, se si guardano i proponimenti enunciati nel primo numero (1/04), i traguardi conseguiti sono ben più di uno. Innanzitutto, il numero esce, con regolarità sul piano editoriale: segno che la rivista ha saputo suscitare l'interesse di chi, ricercatore o tecnico, si occupa di agrometeorologia. E, a tal proposito, sta avendo successo anche l'obiettivo di far dialogare le due "anime" della disciplina, visto che questo numero ospita un buon bilanciamento fra contributi nella sezione scientifica e in quella tecnica. Tra questi, ritengo opportuno segnalare le note sulla climatologia, che potrebbero divenire un punto di riferimento costante ed aggiornato per chi è interessato a conoscere le mutevoli condizioni ambientali presenti nel nostro Paese.

Complessivamente, il numero di lavori pubblicati è aumentato rispetto al volume 1/04 (il confronto con il n° 1/05 non è praticabile, visto che esso è stato dedicato ad ospitare gli extended abstracts del convegno di Vasto), così come il numero di pagine. Abbiamo guadagnato nuovi autori, dato che solo pochissimi sono i nomi comuni ad entrambi i numeri. Viene mantenuta la presenza di contributi in inglese, a conferma dell'interesse ad allargare la visibilità della rivista.

Altro obiettivo puntualmente colto riguarda la velocità di pubblicazione: praticamente tutti gli articoli hanno visto le stampe entro un anno dal ricevimento, per alcuni i tempi sono stati ridotti a pochi mesi. C'è poi una importante novità, la presenza di inserzionisti, a conferma che anche il mondo imprenditoriale vede una rivista viva ed attraente.

Tutto questo, grazie alla collaborazione dei referees, che nella maggior parte dei casi hanno svolto il loro lavoro con tempestività ed efficacia e ai quali va il mio sentito ringraziamento, ma anche e soprattutto all'opera competente, appassionata e spassionata di Roberto Confalonieri e Andrea Cicogna, le due colonne portanti della redazione.

Siamo dunque sulla buona strada, con l'augurio e l'impegno di saperla consolidare.

Maurizio Borin

Indice – *Summary*

Pubblicità sulla Rivista Italiana di Agrometeorologia

In questa Rivista può trovare spazio pubblicità relativa al settore Agrometoerologico.

Condizioni economiche:

- pagina intera 4° di copertina 500 €
- pagina intera – interna 200 €
- modulo minimo: mezza pagina.
- sconto per soci sostenitori dell'AIAM: 10%.

Poichè la ragione sociale dell'Associazione impedisce attività commerciale i fondi saranno introitati a titolo di contributo e saranno finalizzati alla copertura delle spese di pubblicazione della rivista. Si precisa inoltre che il contributo non è deducibile dalla dichiarazione IRPEF in quanto AIAM non è una ONLUS.
Le richieste devono essere inviate al presidente dell'Aiam dott. Luigi Mariani (all'indirizzo info@agrometeorologia.it o al numero telefonico 329/7027077) che è disponibile per ogni ulteriore dettaglio.
Si precisa infine che le richieste che perverranno saranno soddisfatte in ordine di priorità di ricevimento.

DIGITAL TERRAIN ANALYSIS: DATA SOURCE, RESOLUTION AND APPLICATIONS FOR MODELING PHYSICAL PROCESSES IN AGROECOSYSTEMS

ANALISI DIGITALE DEL TERRITORIO: DATI, RISOLUZIONE ED APPLICAZIONI PER LA MODELLAZIONE DI PROCESSI FISICI IN AGROECOSISTEMI

Bruno Basso[1]

[1]*: Department of Cropping Systems, Forestry and Environmental Sciences,University of Basilicata Via Ateno Lucano, 10, Potenza 85100, Italy Tel: +39-0971205386 ; Fax +39-0971-205378 basso@unibas.it;*
Adjunct Professer, School of Natural Resource Sciences Queensland University of Technology, Brisbane, Australia

Ricevuto 10 maggio 2005, accettato 13 luglio 2005

Abstract
Terrain analysis is the quantitative analysis of topographic surfaces. Most attempts at modeling landscapes have been unsuccessful because the landscape was either looked at in little details or the landscape was considered in two dimensions. The purpose of a digital terrain system is the digital representation of terrain so that environmental problem like soil erosion may be approached accurately and efficiently through automated means.
This paper describes data requirements, methods for storing surface data, advantages, limitations and applications of digital terrain analysis for agriculture and environmental processes modeling. A practical application of the digital terrain model SALUS-TERRAE is presented as case study to simulate spatial variability of soil water content in an agricultural landscape.

Keywords: Digital Terrain Analysis (DTA), Spatial Soil Water Balance, Digital Elevation Model (DEM), Topography; SALUS-TERRAE

Riassunto
L'analisi quantitativa della superficie topografica è detta "terrain analysis". Lo scopo di tale analisi è la rappresentazione digitale del territorio in modo che problemi ambientali come l'erosione del suolo potrebbero essere affrontati in maniera accurata ed efficiente attraverso comandi automatici includendo l'influenza della topografia.
Diversi tentativi di rappresentare i modelli digitali del territorio sono falliti, o perché erano presi in considerazione in piccoli dettagli oppure perché il territorio era considerato in sole due dimensioni. Questo lavoro descrive dati topografici, metodi per la raccolta di dati topografici, vantaggi, limiti ed applicazioni dell'analisi digitale del territorio per la modellazione di processi fisici in agricoltura e ambiente. E' inoltre presentata un'applicazione del modello di analisi territoriale SALUS-TERRAE per la simulazione della variabilità spaziale del contenuto idrico del suolo su scala di campo agricolo..

Parole chiave: *Analisi Digitale del Territorio, Bilancio idrico Spaziale del Terreno, Modello di Elevazione Digitale, Topografia, SALUS-TERRAE*

Rationale

The evolution of modern management techniques has led Three-dimensional data patterns have high information content and can be a powerful vehicle for conveying essential landscape surface information. Terrain analysis is the quantitative analysis of topographic surfaces. Topographic attributes, including specific catchment area, slope, aspect, plan curvature can be calculated and used to predict spatial patterns of soil water content and soil erosion, solar radiation estimation, spatial distribution of soil physical and chemical properties, spatial distribution of vegetation and prediction of vegetation types.
Most attempts at modeling landscapes have been unsuccessful because the landscape was either looked at in little details or the landscape was considered in two dimensions. Basically, digital terrain analysis provides the basis for a wide range of landscape-scale environmental models, which are used for solving research-related problems as well as management decisions.
The objective of this paper is to describe data requirements, methods for storing surface data, and to highlight the advantages and previous limitations of digital terrain analysis for agro-ecosystems modeling. A practical application of the digital terrain model SALUS-TERRAE is presented as case study to simulate spatial variability of soil water content in an agricultural landscape.

Digital Elevation Model
There is a long history of studying landscape surfaces and an abundant knowledge and technology to measure topographic attributes has been developed. A Digital Elevation Model (DEM) is the source of the primary data used as a source of topographic surfaces information alone (Pike, 1988), for landscape modeling (Moore *et al.*, 1991, 1993) as data layers in a GIS (Wiebel and Heller, 1991) and as ancillary data in remote sensing image analysis (Franklin,

1987). In principle, a DEM describes the elevation of any point in a given area in digital format. A discrete representation of a spatially continuous surface is merely a sample of values from the continuous surface. The sample is a finite set of spatial points with definite value (x,y,z) in a given coordinate system. A continuous surface has infinite number of points that could be sampled to precisely represent the surface. Sampling the infinite points of the continuous surface is impractical and unnecessary; indeed a sampling method is used to extract representative points to build a surface model that approximate the actual continuous surface. A discrete sampling set of a continuous surface can still retain the continuity if it is generated from the original surface by following certain sampling procedure. ESRI (1993) stated that a discrete surface model should:

- accurately represent the surface;
- minimize data storage requirements;
- maximize data handling efficiency;

The type of spatial surface dictates the representation and sampling method of the surface. No matter how smooth the landscape surface appears, it is not a mathematical surface, and cannot be represented using a single mathematical function. A landscape surface is a very particular continuous surface which there is no single mathematical function that could be used to describe it. It is a product of the composition of many geological processes (faulting, erosion, sedimentation). Geological young terrains typically have sharp ridges and valleys, in contrast to older terrains which have been smoothed by prolonged exposure to erosional forces (ERSI, 1993).

There are three principal ways used to represent a surface in digital form: contour lines, arrays of equally spaced sample points, and irregularly spaced sample points (ESRI, 1993). The Vector or Contour line model describes the elevation of terrain by contours (stored as Digital Line Graphs, DGLs), the x,y coordinate pairs along each contour of specified elevation. Vector DEMs are based on the most common form of elevation data storage, the topographic map. Topographic maps are prepared directly from aerial photographs or field surveys so the information has undergone the minimum of manipulation, therefore minimizing errors. In the digital contour structure the elevation is recorded only once per contour string. The most popular way to represent a surface is the array of equally spaced sample points. The surface is represented by a "*regular grid"*, or matrix, of elevation values. Gridded elevation models can be distributed as simple matrices of elevation, with the location of a single point and the grid spacing, implying the horizontal locations of all other points. Carter (1988) describes the methodologies for the digital representation of topographic surfaces. Topographic surfaces are non-stationary, more specifically, the roughness of the terrain is not periodic but changes from one land type to another. A regular grid therefore has to be adjusted to the roughest terrain in the model and be highly redundant in smooth terrain. It is apparent that, if one has to model these non-stationary surfaces accurately and efficiently, one must use a method that adapts to this variation. In response to this problem the Triangulated Irregular Network (TINs) was created. TINs are based on "coordinate random" but "surface specific" sample points. The location of these model would be dictated solely by the surface being modeled. By "surface specific" it is meant that they would be clustered in those regions of maximum roughness. In its most common form, the TIN is a set of irregularly-spaced points connected into a network of edges that form space-filling, non overlapping triangles. The points are usually connected according to a Delaunay triangulation, a procedure that joins the centers neighboring Thiessen polygons. The facets are usually assumed to planar. The irregular nature of the TIN has many advantages and disadvantages. The primary advantage is variable resolution: a TIN can include many points where the surface is rugged and changing rapidly, but at the same time, only a few points in areas where the surface is relatively uniform. Another significant advantage is the ability to include important surface points (peaks, pits, passes, road and stream intersections, points along ridges and drains) at their exact locations (due to the precision of the coordinate storage). These advantages are countered by complexities in storage and manipulation. Unlike a regular grid which provides an implicit neighborhood through the mechanism of the matrix, a TIN system would have to include this neighborhood explicitly (Peucker *et al*., 1975). Indeed, the location of every point in a TIN must be specified in the x,y, and z dimensions, as well as the topology of the points (the edges and adjacencies of the triangles). An intensive comparison between these three structures, together with applications of terrain analysis methods based on these structures for calculating topographic attributes and terrain-based indices of a variety of hydrological, geomorphological and biological processes is discussed by Moore *et al*., (1991a) and Kumler (1994).

Data Source of Digital Elevation Models.

In principle, any data that contains the elevation information with location context can be a DEM data source. Practically, the main source of data for producing the digital elevation model are topographic contour lines, randomly distributed elevation points, the frame points of land surface such as peak, sinks, passes, points of change in slope, ridges, stream channels and shorelines, as well as stereoplotter data (e.g. stereo aerial-photo pair or stereo SPOT image pair) etc. Stereocorrelated DEMs are created from two complementary images, aerial photographs, or satellite images (Schenk, 1989). Raw data in the form of stereo photographs or field survey (the accurate data source) are not readily available to potential end users of a DEM. Therefore, most users must rely on published topographic maps or DEMs produced by government agencies such as the United States Geological Survey (USGS). USGS produces several standard types of DEM data:

- 7.5-minute DEMs have a 30-by-30 meter point spacing in x and y;
- 30-minute DEMs have 2-by-2 arc second point spacing, approximately 60-by-60 meter point spacing in x and y;
- 1-degree DEMs have 3-by-3 arc second point spacing, approximately 100-by-100 meter spacing in x and y.

Spatial resolution and accuracy of digital elevation model.

The distance between two adjacent cells, or the geometric size of a cell or pixel in the x and y horizontal directions is called the spatial resolution of the DEM (or "grain"). The spatial resolution of a DEM is higher than another if its cell size is smaller than another's. Spatial resolution is refined if cell size is decreased, or coarsened, if cell size is increased. Generally, the finer the spatial resolution is, the higher the accuracy of the DEM. The number of cells of a DEM covering a certain area will be increased when increasing the spatial resolution, and vice versa. The spatial resolution is very dependent upon the primary data used to produce the DEM, and the cost of computer storage and processing time.

The optimum spatial resolution of a DEM is closely related to the spatial scale of the of landscape pattern analysis and geo-modeling. For example, when soil properties with broad geographic extent are required, then a DEM with relatively coarse spatial resolution is indicated. To model detailed spatial distribution of soil properties, instead, a fine spatial resolution DEM will be needed. The topographic attributes computed from DEMs are dependent on the resolution of the elevation data from which they are computed. A regular grid is not an ideal representation of topographic surfaces for the study of scale effects. Gallant and Hutchison (1997) pointed out that when we subsample an elevation grid to obtain another grid at coarser resolution, beside the intended change in losing fine scale features of the surface, we also change the number of square cells into which the surface is divided. This is of particular importance when studying a "specific catchment area" that is computed by accumulating cell areas from adjacent cells. Thus, it is important not to confuse scale effect with grid effect if the objective is to study scale properties of a topographic surface. Gallant and Hutchinson (1997) suggested that to appropriately represent a topographic surface for the analysis of scale effects, the size and shape of features should be assessed at different scales.

The accuracy of DEMs in representing the land surface is mainly dependent upon its source data spatial resolution (USGS, 1987). If we build the DEM from contour data that have been captured directly from aerial photographs as primary data using a stereopotter, the contours are highly accurate (ESRI, 1993) and the accuracy of the DEM could be high. However, when the contours have been generated from point data, the accuracy could be lower because contours must be interpolated. A DEM usually uses discrete sampling points with raster structure to represent the relief of the landscape surface. Generally, it is difficult using discrete sampling points to represent every detailed feature and anomaly such as streams, ridges, peaks, and pits. Consequently, the higher the spatial resolution, the more detailed information content the DEM could represent and therefore the more accurate the DEM is. Conversely, a DEM with lower spatial resolution will miss more detailed information of the land surface. With a standard DEM, most terrain features are generalized by being reduced to grid nodes spaced at regular intersections in the horizontal plane. This generalization reduces the ability to recover position of specific features less than the interval spacing. Theoretically, for a given source data set, the only way to enhance the representation of detailed information of the landscape surface is to refine the spatial resolution of the DEM; as the spatial resolution is refined, there is an increasing likelihood that significant features of land surfaces will be represented. Nevertheless, it is not possible for a DEM to obtain more detailed information than that contained in the source data. Hutchinson (1996) shows how DEM resolution can be matched to information content of source data. Moreover, the spatial resolution of a DEM required to contain detailed information of a landscape surface varies with roughness characteristics of natural landscape surface. A rough surface usually needs a DEM with relatively fine resolution, while a coarse spatial resolution will be required by a smooth surface. After selecting the source data at the appropriate scale, the final stage is to interpolate the source data to a grid of elevation points. There are many choices here, and the quality of the DEM is critically dependent on this stage. General-purpose interpolation methods such as Kriging will produce a surface that is reasonably consistent with the data but may contain features such as sinks that are not really present in the real topography. They may also introduce biases that only become apparent when deriving terrain attributes such as slope and aspect for the DEM. The attention to shape and the drainage characteristics of the surface are critical to the production of a high quality DEM. The ANUDEM (Hutchison, 1989) program is widely used and regarded as the best technique available for producing grid DEMs from contour, spot height and stream line data. ANUDEM is based on general-purpose spline interpolation algorithms with a number of special features which make it particularly useful for DEM production. It automatically enforces surface drainage, removing spurious sinks, and adjusts the shape of the surface to agree with stream line data. The program also provides useful diagnostic information for detecting errors in the input data. ANUDEM is available inside ARC/INFO as the topogrid command.

Digital Terrain Modeling

Digital Terrain Models (DTM) have been used in geoscience application since the 1950s (Miller and Laflamme 1958). Since then, they have become a major constituent of geographical information processing. They provide a basis for a great number of applications in the earth and the engineering sciences. In GIS, DTMs provide an opportunity to model, analyze and display phenomena related to topography. Indeed, DTMs include the spatial distribution of terrain attributes. The spatial distribution of topographic attributes can thus be used as a direct or indirect measure of spatial variability of these processes.

Digital terrain modeling encompasses the following general tasks (Weibel and Heller, 1991):

DTM generation: sampling of original terrain data, formation of relations among the diverse observations;

DTM manipulation: modification and refinement of DTMs;

DTM interpretation: DTM analysis, information, extraction from DTMs
DTM application: development of appropriate application model for specific disciplines.

Landscape topographic attributes
Landscape topographic attributes are spatial variables that are used to describe and represent the shape and pattern of the landscape surface. Digital terrain analysis and GIS technology provide tools to quantitatively define landscape attributes.
Speight (1974) described over 20 attributes that can be used to depict landforms. Moore *et al*., (1991b, 1993a) also described terrain attributes and divided them into categories: primary and secondary or compound attributes. Primary attributes are directly calculated from elevation data and include variables such as elevation, slope, aspect, curvature etc.
Secondary or compound attributes involve combinations of the primary attributes and are indices that describe or characterize the spatial variability of specific processes occurring on the landscape such as soil water content or the potential for sheet erosion.

The mathematical representation of most attributes and the methods for calculating them can be found in Moore (1991a, 1993b), ESRI (1993), Gallant and Wilson (1996, 2000).
Topographic attributes can also be divided in local, regional, catchment and process oriented. Local topographic attributes are those that can be calculated from a small neighboring area surrounding the DEM cell using certain algorithm. The neighboring area is usually 3x3 cells. Table 1 gives most of these attributes. The accuracy of the local topographic attributes is closely related to the spatial resolution of the DEM.
Regional topographic attributes are those attributes that are calculated using considerabily larger geometric area than the local topographic attributes (Table 2). The regional topographic attributes are less sensitive to the spatial resolution of the DEM than local topographic.
Catchment oriented topographic attributes (Table 3) are those attributes that are related to the whole catchment area, and are the measurement of certain catchment characteristics. The output value of the attribute at each DEM cell is calculated from certain combinations of all of DEM cells in the catchment. The catchment oriented topographic attributes have very little sensitivity to the spatial resolution of the DEM.
Finally, the process oriented topographic attributes (Table 4) are those attributes that describe or characterize the spatial variability of a simple representation of specific processes that occur on the landscape which can be calculated from the DEM.
Several researchers (Jones, *et al*., 1989; Bell *et al***.**, 1992; Moore *et al*., 1993c; Gessler *et al*.; 1995; Timlin *et al* 1998; Xu, 1999, Kravchencko *et al*, 2000, 2003, 2005; Kitchen *et al*., 2003; Kutcher *et al*., 2005) have found high correlation between changes in these terrain variables and changes in soil drainage characteristics, A horizon depth, organic matter content, extractable-P, pH, sand, silt and soil taxonomic classes and crop yield.

Tab. 1 - Local topographic attributes
Tab. 1 - Attributi topografici locali

Attribute	**Definition**
Altitude	Elevation above sea level
Slope	Maximum rate of change in elevation from each DEM cell
Aspect	Direction of the maximum rate of change in elevation from each cell DEM
Surface curvature	Measure of the surface convexity or concavity
Profile curvature	Curvature of a surface in the direction of steepest slope
Plan curvature	Curvature of a surface perpendicular to the direction of steepest slope
Tangent curvature	Plan curvature multiplied by the slope

Tab. 2 - Regional topographic attributes
Tab. 2 - Attributi topografici regionali

Attribute	**Definition**
Upslope area	Catchment area above a short length of contour
Upslope slope	Mean slope of upslope area
Upslope height	Mean height of upslope area
Upslope length	Mean length of flow paths to a point in the catchment
Dispersal area	Area downslope from a short length of contour
Dispersal slope	Mean slope of dispersal area
Dispersal length	Distance from a point in the catchment to the outlet
Flow path length	Maximum distance of water flow to a point in the catchment
Specific catchment area	Upslope area per unit width of contour
Elevation percentile	Ranking of the central point elevation compared to all the points in the surrounding region with a given area radius
Elevation difference	Difference between the central point elevation compared to all the points in the surrounding region with a given area radius
Elevation deviation	Elevation difference scaled by the standard deviation of elevation of the surrounding region with a given area radius
Elevation standard deviation	Standard deviation of the surrounding region with a given area radius
Elevation semi-variance	Two-dimensional semi-variogram of the surrounding region with a given area radius. It is an appropriate measure of the two-dimensional fractal dimension of the region

Tab. 3 - Catchment oriented topographic attributes
Tab. 3 - Attributi topografici a scala di bacino

Attribute	Definition
Catchment area	Area draining to catchment outlet
Catchment slope	Average slope over the catchment
Catchment length	Distance from highest point to catchment outlet

Tab. 4 - Process oriented topographic attributes
***Tab. 4** - Attributi topografici di processi*

Attribute	Definition
Terrain wetness index (TWI)	TWI = ln (A_s/tanβ) where, A_s = upslope area / flow width, β is the slope

Topographic attributes, including specific catchment area, slope, aspect, plan curvature can be calculated and used to predict spatial patterns of soil water content and soil erosion (Beven and Kirkby, 1979; Moore and Wilson, 1992; Moore *et al*., 1993c; Wilson and Gallant, 1996); solar radiation estimation (Moore *et al*., 1993; Wilson and Gallant, 1998); spatial distribution of physical and chemical properties of the soil (Moore *et al*., 1993c; Gessler, *et al*., 1995); spatial distribution of vegetation (Moore *et al*., 1993a) and prediction of vegetation types (Brown, 1994).

Terrain-based hydrological modeling

In recent years, considerable progress has been made in the development of computer-based mathematical and computational techniques to model hydrological processes at various scales of analysis. GIS technology has become widely used in hydrological and water quality modeling. Hillslope hydrologists have long assumed that the downslope movement of water can be described by surface topography since gravitational potential largely dominates hydraulic gradients in steep terrains. Hence with the increased availability of DTMs, surface topography is driving many popular hydrological models. Since the first computer-based model hydrologic models were developed in the early 1960's, hydrologists have been attempting to use micro-scale process descriptions in mesoscale (catchment scale) hydrology. The massive computational effort required to solve equations describing processes in three dimensions and the intensive inputs requirement for the physically based model has limited the success of such models. However, computations may be reduced if the dimensions can be reduced from three to two. This concept was first applied by Onstad and Brakensiek (1968) and Onstad (1973). The proposed a flow net of gravitational potential between contours and their orthogonals (lines of steepest slope). Water was routed laterally down strips of land elements defined by this network and they termed this approach "stream path" or "stream tube". Adjacent contour lines and streamlines define irregularly shaped elements. Surface runoff enters an element orthogonal to the upslope contour line and exists orthogonal to the downslope contour line. Flow from one element can then be successively routed to dowslope elements formed by the same stream tube. Moore and Grayson, 1991 adopted this approach in their chatchment partition model: TAPES-C (Topographic Analysis Programs for the Environmental Sciences-Contour. TAPES-C performs the partitioning of the catchement beginning at the contour line of lowest elevation and ending at the highest contour line, successively determining the elements for each adjacent pair of contour lines. TAPES-C has been used for distributed hydrological modeling that accounts for the effect of three dimensional terrain on storm runoff generation. THALES (Grayson *et al*., 1992) is the hydrologic model that is coupled with TAPES-C. This DTM has two major limitations: the first is that it cannot handle depression for the flow network, thus requires a depressionless DEM, which is not a reality in many agricultural fields. The second limitation is that being the model mechanistic, it requires several inputs that are often not available. Also, there is inconsistency in scale between the measurements of field variables and the way they are applied in the models.

TAPES model has also a grid version, TAPES-G (Gallant and Wilson, 1996). TAPES-G generates primary and secondary attributes from a DEM and it is consider a static model since it does not contains a dynamic water balance model. Through the generation of topographic attributes, TAPES-G has been applied in a variety of environmental modeling applications. In respect to hydrological modeling, flow routing is available in TAPES-G with four different algorithms. Flow is routed from one cell to one and only one of its eight neighbor cells is based on the deepest descent. This algorithm, called D8 produces parallel lines of flow along preferred directions. A second algorithm for flow directions (Rho8) aims to break the up the parallel flow lines by introducing a random disturbance to the flow direction. The Rho8 algorithm is stocastic, indeed produces a different flow network each time it is run. Flow dispersion is introduced in FD8 and FRho8, where the fractional amount of flow dispersed to each of the neighbors depends on the slope from the center cells to the neighbor. TAPES-G also computes the terrain wetness index (TWI), helpful in identifying areas of divergence and convergence based on the slope gradient. Where the slope gradient is low, the soil becomes wetter because the water is not removed to other downslope elements. Moore *et al*., (1988) found a strong correlation between this index and the distribution of surface soil water content. Gessler *et al*. (1995) found that the index, along with plan curvature, is a fairly good predictor of soil properties (A horizon depth, solum depth).

With a similar approach of TAPES-C, TOPOG, an ecohydrological model, was develop by CSIRO in Australia to predict plant growth and the three dimensional water and salt balance of heterogeneous catchments. Vertessy *et al*., 1993 describe the framework of this physically based, distributed parameter catchment model. The models uses Richard's equations for vertical moisture flow, in multilayered soils, Darcy's Law for for lateral saturated flow, the convection-dispersion equation for solute transport,

and evapotranspiration based on the Penman-Monteith model. Soil water extraction is through a distributed root system from the multilayered soil, and there is water exchange with the underlying aquifer system. The model demands significant input data that are costly, time consuming and difficult to measure, so most of the model inputs have to be guessed (Refsgaard *et al*., 1992). Vertessy *et al*., (1993) have used TOPOG to predict water yield from a mountain ash forest. Modelled and observed daily runoff compared well. Over the full period of simulation (12 years) the model overpredicted runoff by less 5%.

Beven and Kirky, (1979) developed an hydrological model called TOPMODEL with the general thinking that variable source areas could be identified and the process of modeling basin hydrology be simplified, by summarizing the saturation potential, based on topographic position.

Several other terrain-based overland flow, runoff and non-point source pollution model have been reported in the literature, including the TIN-based models of Jones *et al*. (1990); grid-based models such as SHE (Abbott el al., 1986), MEDRUSH, Kirky *et al*., (1996), WEPP, Laflen *et al*., 1997, Cochrane and Flanagan, (1999), Wang and Hjelmfelt (1998).

The hydrological models examined in this review were all physically based and such approach has come to scrutiny in recent years (Grayson *et al*., 1992 a, b,). There is a considerable scepticism about their use in hydrology, because the concerns related to the scarsity of appropriate input and validation datasets. Also most of them are based on Richards equations for water flow, that can produce good results for soil evaporation, but it cannot predict plant evaporation as well when the root system is present (Ritchie and Johnson, 1990). The current DTMs cannot handle depression for flow network, thus requiring a depressionless DEM, which is not a reality in many agricultural fields. These DTMs were designed for large-scale applications and for quantifying water quality running into streams, thus the sinks and depressions are filled to have a continuos flow of water down to the streams.

To overcome the limitations mentioned above, a new DTM called TERRAE was developed (Gallant, 1999). TERRAE constructs a network of elements by creating flow lines and contours from a grid DEM. TERRAE can create contours at any elevation in the grid and does not rely on pre-defined contours. Each element created by TERRAE is an irregular polygon with contours as the upper and lower edges and flow lines as the left and right edges. The elements are connected so that the flow out of one element flows into the adjacent downslope element. The element network created by executing TERRAE is used by the spatial soil water balance model, SALUS-TERRAE (Basso, 2000). Surface runoff and subsurface lateral movement is routed from one element to the next starting from the top element and moving downward. The spatial soil water balance model allows the presence of different soil types to a maximum equal to the number of the elements created. The output element attributes include: the element number, the area of the element, the slope of the element and the x, y and z coordinates of the center of the element and the topology (the connections of the elements). The daily loop is initiated by reading the weather information and by calculating the soil water balance for the downward flow for each of the element. The surface runoff produced by each element is moved laterally to the next downslope element. The amount of surface runoff is calculated by multiplying the surface runoff of the upslope element by the area of the element. This amount of water is added onto the next downslope elements as additional precipitation. If there is not a downslope element, the surface water runs off to the field outlet. The downward flow is calculated by introducing a correction factor to account for the slower flow that occurs at the deeper layers. The correction factor consists in separating the saturated hydraulic conductivity (KSAT) variable into a KSAT for the effective vertical flow (KSAT-Vert) and a KSAT for the saturated flow (KSAT-Macro). Details on SALUS-TERRAE are described in Basso (2000), Batchelor *et al*., 2002.

Case Study: application of SALUS-TERRAE to simulate spatial variability of soil water content in an agricultural landscape

Models that consider the dynamics of soil water balance and crop growth have been extensively used to quantify the risk related to the uncertainty in water supply (Ritchie 1991, Jones and Ritchie, 1996, Braga *et al*., 1999). The CERES family models have proven to be effective in simulating the water balance of soils when the drainage is vertical, often an unrealistic assumption. Runoff produced by such models is only from a point in space and there is no account for the water over space and time. To use such models for erosion estimates and for poorly drained soil, sloping terrain, the spatial and temporal relationship between various hydrological processes must be addressed.
Without accounting for the terrain characteristics, accurate prediction of soil water balance is not possible.
The automation of terrain analysis and the use of Digital Elevation Models (DEMs) has made it possible to easily quantify the topographic attributes of the landscape and to use topography as one of the major driving variables for many hydrological models.

The overall hypothesis of this study is that the terrain characteristics and landscape positions control soil physical properties through organic matter accumulation, formation of soil horizons and soil structure that highly influence the soil water balance. Landscape position also determines how much precipitation infiltrates into the soil profile and for how long water can pond on the surface, as well as how much water can pond before it infiltrates or runs off to other areas in the landscape. In this study, it is also hypothesized that the partitioning between vertical and lateral movement at a field-scale level will help us to better predict the complete soil water balance and consequently the available water for the plants over space and time.

The study evaluated the capability of SALUS-TERRAE applied at field scale with rolling terrain to simulate spatial variability of soil water content.
Soil water content was extensively measured in a three ha portion of a field located 10 km south of Durand, MI, to compare them with model predictions. The field was planted with soybeans on May 5, 1997. A digital elevation model (DEM) was created for the site using a high accuracy differential global positioning system (DGPS) at 1 m grid resolution (F.J Pierce and T.G.Mueller, personal communication, 1997). Using the DEM, the following topographic attributes were determined for the site: elevation, slope, plan curvature and profile curvature. A regular grid consisting of 28 grid locations spaced 30.5 m apart was imposed on the experimental area. Latitude, longitude and elevation of each grid points were determined with DGPS. Neutron probe access tubes were installed at each of the 28 grid locations. A neutron moisture gauge was used to measure the spatial variability of soil water content at 15-cm increments to the depth of the C horizon or a maximum of 150 cm depth, which ever occurred first. Measurements on soil water were taken on a weekly basis throughout the season. The upper and lower limit of soil water availability was determined using soil water measurements taken in the field, and from empirical equations based on soil texture (Ritchie *et al.*, 1999).
The spatial structure for each parameter was assessed using a semivariance analysis (data not shown). Soil water measurements taken on each grid point were interpolated using punctual kriging technique available in GS+ Version 3.1a (Gamma Design Software, 1999).
A simulation run of SALUS-TERRAE was done using a soil type with no restricting soil layer for the entire area with a high rainfall (76 mm) occurring on the first day. This simulation was chosen to demonstrate the ability of the model to partition the vertical and horizontal subsurface flow. The performance of the model was evaluated by the RMSE between the predicted and observed values.

The model results for the first simulation run are shown in Figures 1 through 8. The units used in the outputs for all the variables are in cm (height of water). Figure 1 shows the ponding capacity of soil surface. The model was able to correctly determine that the depression areas have higher surface ponding capacities. The net surface flow (Fig. 2) is calculated by subtracting the amount of water coming onto the element from the one leaving the element. The highest value (-5 cm) is observed on top of the
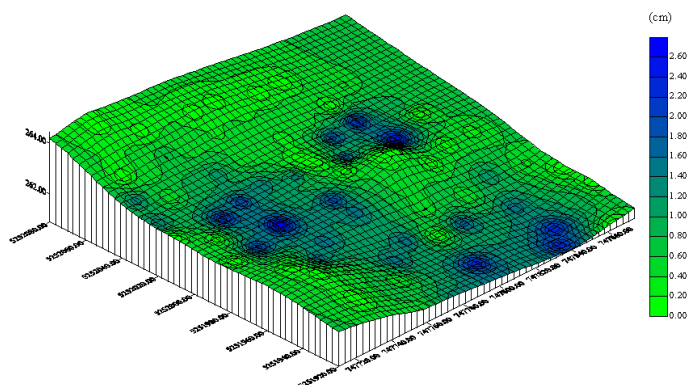
Fig. 1 - Map of surface ponding (cm)
Fig. 1 - *Mappa del ristagno idrico superficiale (cm)*
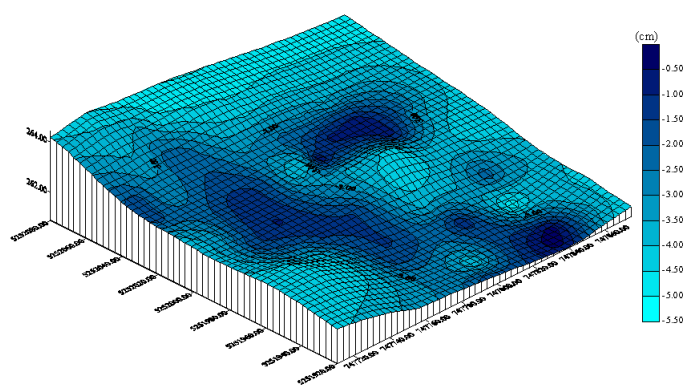
Fig. 2 - Net surface flow (cm) calculated as difference between runon-runoff
Fig. 2 – *Flusso superficiale netto calcolato come differenza tra apporto da ruscellamento e perdita da ruscellamento*
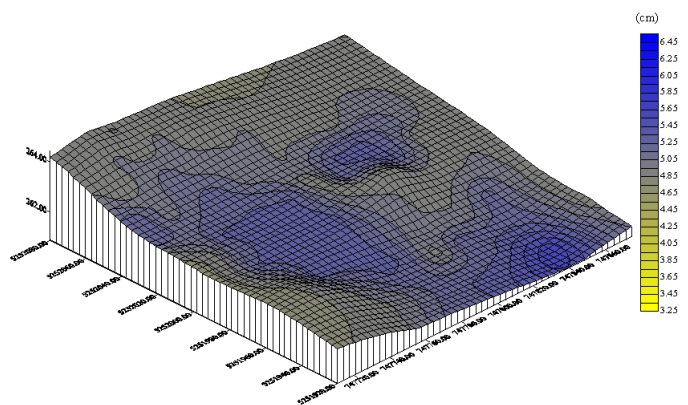
Fig. 3 - Soil water content (layer 0-26 cm)
Fig. 3 - *Contenuto idrico del terreno per lo strato 0-26 cm*
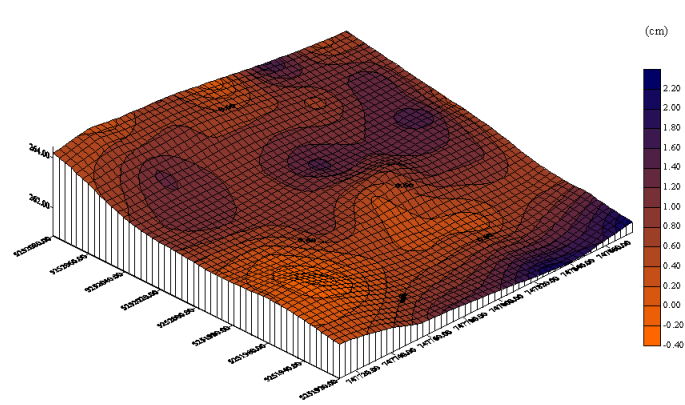
Fig. 4 - Error map of soil water content (cm) for the layer 0-26 cm
Fig. 4 – *Mappa dell'errore del contenuto idrico (cm) del terreno per lo strato 0-26 cm*

landscape since those elements do not have water running onto them, while the area with values close to zero represents areas where the soil receives as much water as it loses. Figure 3 shows the soil water content for the 0-26 cm. The soil water content for the 0-26 cm is uniform across the field, except for the low elevation areas, which are higher due to accumulation of surface flow onto the elements. The error map, calculated as difference between the soil water content measured and the soil water content simulated is shown in figure 4.
The model performance was compared using the root mean square error (RMSE). The RMSE observed was 0.51 cm, for the 0-26 cm depth and 0.62 cm for the 26-77 depth (Figure 5). The simulated soil water content for the points located in the upper saddle (263 m) are compared with soil water measurements in Figure 6. The RMSE observed for this comparison were 0.39 cm for the 0-26 cm depth and 0.52 cm for the 26-77 cm depth.Figure 7 shows the comparison between simulated and simulated soil water content for the lower saddle point (262 m). A RMSE of 0.46 cm and 0.49 was observed for this comparison for the 0-26 cm and 26-77 cm depth. An evaluation of the model performance was also done for the depression area of the streamline selected (260 m). The RMSE observed for this evaluation were 0.47 cm for the 0-26 cm and 0.59 cm for the 26-77 cm depth (Figure 8).

Conclusions

This paper reviews the principles of digital terrain analysis and the description of data source, accuracy and resolution of digital elevation models. The paper also describes the application of SALUS-TERRAE, a digital terrain model with a functional spatial soil water balance model, at a field scale to simulate the spatial soil water

Fig. 5 - Measured and simulated water content for the soil profile (0-26 cm)and (26-77 cm) for the high elevation zone (peak) for the entire season.

Fig. 5 *– Contenuto idrico del terreno per lo strato 0-26 cm e 26-77 cm misurato e simulato per una zona di elevata altitudine (cima) per l'intera stagione.*
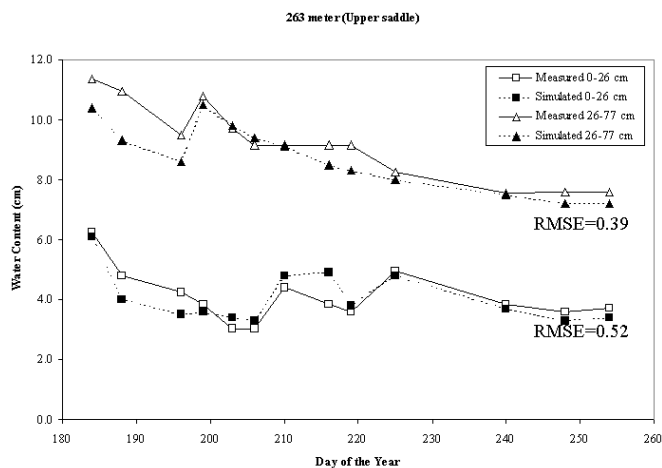
Fig. 6 - Measured and simulated water content for the soil profile (0-26 cm)and (26-77 cm) for the medium elevation zone (upper saddle) for the entire season.

Fig. 6 *– Contenuto idrico del terreno per lo strato 0-26 cm e 26-77 cm misurato e simulato per una zona di media altitudine (sella superiore) per l'intera stagione.*
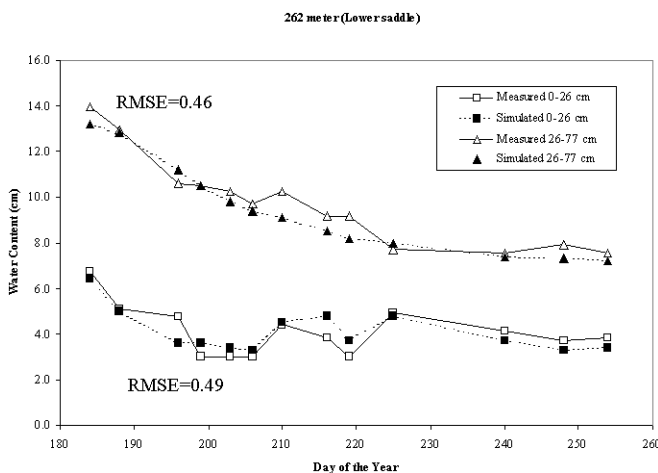
Fig. 7 - Measured and simulated water content for the soil profile (0-26 cm) and (26-77 cm) for the medium elevation zone (lower Saddle) for the entire season.

Fig. 7 *- Contenuto idrico del terreno per lo strato 0-26 cm e 26-77 cm misurato e simulato per una zona di media altitudine (sella bassa) per l'intera stagione.*
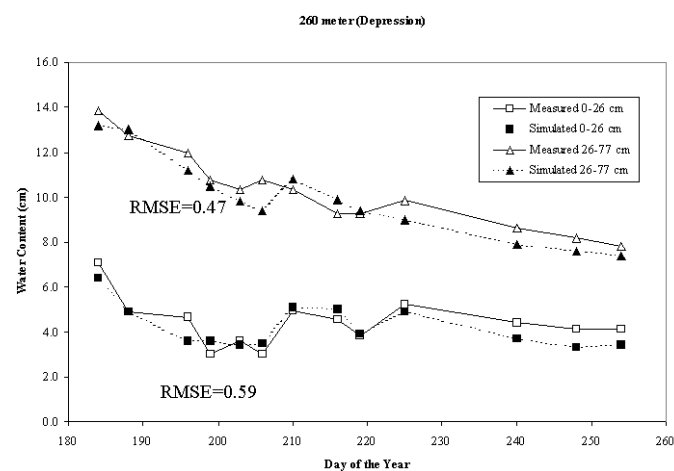
Fig. 8 - Measured and simulated water content for the soil profile (0-26 cm) and (26-77 cm) for the low elevation zone (depression) for the entire season.

Fig. 8 *– Contenuto idrico del terreno per lo strato 0-26 cm e 26-77 cm misurato e simulato per una zona di bassa altitudine (cima) per l'intera stagione.*

balance and how the terrain affects the water routing across the landscape.
The model was able to partition the subsurface lateral flow and the vertical drainage differently for the soils presents in the field. The model provided excellent results when compared to the field measured soil water content. The RMSE between measured and simulated results varied from 0.22 cm to 0.68 cm.
The performance of SALUS-TERRAE is very promising and its benefits can be quite substantial for the appropriate management of water resources as well as for identifying the areas across the landscape that are more susceptible for erosion. It is necessary to further validate the model with different soils, weather and terrain characteristics.

References

Abbott, M.B., J.C. Bathrust, J.A. Cunge, P.E. O'Connell, and J. Rasmussen. 1986. An introduction to the European System-System Hydrologique Europeen, "SHE", 2, Structure of a physically-based, distributed modeling system. J. Hydrol. 87: 61-77.

Basso, B. 2000. Digital Terrain Analysis and Simulation Modeling to Assess Spatial Variability of Soil Water Balance and Crop Production. Ph.D. Dissertation. Michigan State University. East Lansing. MI

Batchelor, W.D., B. Basso, J.O. Paz. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. Eur. J. Agron. Vol. 18, pp. 141-158.

Bell, J.C., R.L. Cunningham, and M.W. Havens. 1992. Calibration and validation of a soil-landscape model for predicting soil drainage class. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 1860-1866.

Beven, K.J., and M.J. Kirky. 1979. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrol. Sci. Bull., 24, 43-69.

Braga, R.P., J.W. Jones, and B. Basso. 1999. Weather Variability in Site-Specific Management Profitability: A Case Study. In: P.C. Robert, R.H. Rust, and W.E. Larson (ed.), Precision Agriculture, pp. 1853-1863. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, USA.

Brown, D.G. 1994. Predicting vegetation types at treeline using topography and biophysical disturbance variables. Journal of Vegetation Science, 5: 641-656.

Carter, J.R. 1988. Digital representations of topographic surfaces. Photogrammetric Engineering and remote sensing, 54: 1577-1580.

Cochrane, T.A., and D.C. Flanagan. 1999. Assessing water erosion in small watershed using WEPP with GIS and digital elevation models. Journal of Soil and Water Conservation, 54: 678-686.

ESRI. 1993. Surface modeling with TIN, in "FrameViewer (TM) 3.1X", the on-line help manual of ARC/INFO System that was developed and is supported by Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI).

Gallant, J.C., and J.P. Wilson. 1996. TAPES-G: a grid-based terrain analysis program for the environmental sciences. Computers and Geosciences, 22: 713-722.

Gallant, J.C., and M.F. Hutchinson. 1997. Scale dependence in terrain analysis. Mathematics and Computers in Simulation 43: 313-321.

Gallant, J.C. 1999. TERRAE: A new element network tool for hydrological modelling.

2nd Inter-Regional Conference on Environment-Water: Emerging Technologies for Sustainable Water Management, Lausanne, Switzerland, 1-3 September 1999.

Gessler, P.E., I.D. Moore, N.J. McKenzie, and P.J. Ryan. 1995. Soil landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. International Journal of Geographical Information Systems, 9: 421-432.

Gessler, P.E., N.J. McKenize and M.F. Hutchinson. 1996. Progress in soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes for environmental models. Proceedings of the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modelling. National Centre for Geographic Information and Analysis, Santa Barbara, CA, USA.

Grayson, R,B., I. D. Moore, and T.A., Mchon. 1992a. Physically based hydrologic modeling, 1: a terrain-based model for investigative purposes. Water Resources Research 28:2639-58

Grayson, R,B., I. D. Moore, and T.A., Mchon. 1992b. Physically based hydrologic modeling, 2: is the concept realistic? Water Resources Research 28:2659-66

Hall, G.F., and C.G. Olson. 1991. Predicting variability of soils from landscape models. In: M.J. Mausbach and L.P. Wilding (eds.), Spatial Variabilities of Soils and Landforms, pp. 9-24. SSSA Special Publication No. 28.

Hutchinson, M.F. 1996. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. Proceedings of the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modelling. National Centre for Geographic Information and Analysis, Santa Barbara, CA, USA.

Hutchinson, M.F. 1997. ANUDEM Version 4.6. http://cres.anu.edu.au/software/anudem

Jones, A.J., L.M. Mielke, C.A. Bartles, and C.A. Miller. 1989. Relationship of landscape position and properties to crop production. J. Soil Water Conserv. 44: 328-332.

Jones, J.W., and J.T. Ritchie. 1996. Crop growth models. In: G.J. Hoffman, T.A. Howell, and K.H. Soloman (eds.), Management of farm irrigation systems. ASAE, St. Joseph, MI.

Kirkby, M.J., A.C. Imeson, G. Bergkamp, and L.H. Cammeraat. 1996. Scaling up processes and models. Journal of Soil and Water Conservation, 51: 391-396.

Kitchen, N.R., S. T. Drummond, E. D. Lund, K. A. Sudduth, and G. W. Buchleiter. 2003

Soil Electrical Conductivity and Topography Related to Yield for Three Contrasting

Soil–Crop Systems Agron. J. 95: 483-495

Kravchenko A.N.and D.G. Bullock. 2000. Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties. Agron. J. 2000 92: 75-83

Kravchenko, A. N., G. P. Robertson, K. D. Thelen, and R. R. Harwood. 2005. Management, Topographical, and Weather Effects on Spatial Variability of Crop Grain Yields Agron. J. 2005 97: 514-523

Kravchenko, A. N., K. D. Thelen, D. G. Bullock, and N. R. Miller.2003. Relationship among Crop Grain Yield, Topography, and Soil Electrical Conductivity Studied with Cross-Correlograms. Agron. J. 95: 1132-1139.

Kravchenko, A.N., D.G. Bullock, and C.W. Boast. 2002. Joint Multifractal Analysis of Crop Yield and Terrain Slope. Agron. J. 92: 1279-1290.

Kumler, M.P. 1994. An intensive comparison of triangulated irregular networks (TINs) and digital elevation models (DEMs). Cartographica, 31: 1-99.

Kutcher, H.R., S. S. Malhi, and K. S. Gill. 2005. Topography and Management of Nitrogen and Fungicide Affects Diseases and Productivity of Canola. Agron. J. 97: 533-541.

Laflen, J.M., W.J Elliot,. D.C., Flanagan, C.R., and M.A. Nearing. 1997. WEPP-Predicting water erosion using a process-based model. Journal of Soil and Water Conservation, 52: 96-103.

Lafolie, F.L., Bruckler, A.M. deCockborne, and C. Laboucarie. 1997. Modeling the water transport and nitrogen dynamics in irrigated salad crops. Irrigation Science. 17: 95-104.

Miller, C.L., and R.A. Laflamme. 1958. The digital terrain model – theory and application. Photogrammetric Engineering 24: 433-42.

Moore, I.D., E.M. O'Laughlin, and G.J. Burch. 1988. A contour-based topographic model for hydrological and ecological application. Earth Surf.Processes Landforms, 13: 305-320.

Moore, I.D., and R.B. Grayson. 1989. Hydrologic and Digital Terrain Modelling using vector elevation data, EOS Trans. AGU 70: 1091.

Moore, I.D., and R.B. Grayson. 1991a. Terrain-Based catchment Partitioning and Runoff Prediction Using Vector Elevation Data. Water Resour. Res. 27: 1177-1191.

Moore, I.D., and M.F. Hutchinson. 1991b. Spatial Extension of Hydrologic process Modelling. Proc. Int. Hydrology and Water Resources Symposium. Institution of Engineers-Australia 91/22, pp. 803-808.

Moore, I.D., R.B. Grayson, and A.R. Ladson. 1991. Digital Terrain Modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications. In: K.J. Beven and I.D. Moore (eds.), 1991. Terrain Analysis and distributed Modelling in hydrology. J.Wiley & Sons.

Moore, I.D., and Wilson, J.P. 1992. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: simplified method of estimation. Journal of Soil and Water Conservation 47:423-8

Moore, I.D., and P.E. Gessler, G.A. Nielsen and G.A. Peterson. 1993. Terrain Analysis for Soil Specific Crop Management. In: Soil Specific Crop Management. ASA-CSSA-SSSA.

Moore, I.D., J.C. Gallant, and L. Guerra. 1993a. Modelling the spatial variability of hydrological processes using GIS in HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water

Resources Management. Proceedings of Vienna Conference, April 1993. IAHS publ. No. 211. p. 161-169.

Moore, I.D., P.E. Gessler, G.A. Nielsen, and G.A. Peterson. 1993b. Soil attribute prediction using terrain analysis. Soil Sci.Soc. Amer. J. 57: 443-452.

Moore, I.D., A. Lewis, and J.C. Gallant. 1993c. Terrain attributes: estimation methods and scale effects. In: A.J. Jakeman, M.B. Beck, and M.J. McAleer (eds.), Modeling Change in Environmental Systems, pp. 191-214. New York: John Wiley and Sons.

O'Laughlin, E.M. 1986. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis, Water Resour. Res. 22: 229-246.

Onstad, C.A., and D.L. Brakensiek. 1968. Watershed simulation by stream path analogy. Water Resour. Res. 4: 965-971.

Onstad, C. A. 1973. Watershed flood routing using distributed parameters, In: E.S. Shultz, V.A. Koelzer, and K. Mahmood (eds.), Floods and Droughts, pp. 418-428. Water Resources Publications, Fort Collins, CO.

Pike, R. J. 1988. The geometric signature: quantifying landslide terrain types from digital elevation models. Mathematical Geology 20 (5): 491-510

Peucker, T. K. and D.H., Douglas. 1975. Detection of surface specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. Computer Graphics and Image Processing, 4:375-387.

Refsgaard, J.C., S.M. Seth, J.C. Bathurst, M. Erlich, B. Storm, G.H. Jørgensen, and S. Chandra. 1992. Application of the SHE to catchments in India, Part 1. General results. J. Hydrol. 140: 1-23.

Ritchie J.T. and B.S Johnson. 1990. Soil and Plant factors affecting evaporation. In: B.A. Stewart and D.R. Nielsen (eds.), Irrigation of Agricultural Crops. Madison, WI. Amer. Soc. of Agronomy.

Ritchie J.T., and D.S. Nesmith. 1991. Temperature and Crop Development. In: Hanks and Ritchie (eds.), Modelling plant and soil systems. Agronomy 31: 5-29.

Ritchie, J.T. 1991. Specifications of the ideal model for predicting crop yield. In: R.C. Muchow and J.A. Bellamy (ed.), Climatic Risk in Crop Production: Model and Management for the semi-arid tropic and subtropic, p. 97-122. Proc. Intl. Symp. S. Lucia, Brisbane, Queensland, Australia. July 2-6, 1990. CAB International Wallingford, U.K.

Ritchie, J.T. 1998. Soil water balance and plant water stress. In: G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom, and P.K. Thornton (eds.), Understanding Options for Agricultural Production, pp. 41-54. Kluwer in cooperation with ICASA, Dordrecht/Boston/London.

Ritchie, J.T., A. Gerakis,. and A. Suleiman . 1999. Simple Model To Estimate Field- Measured Soil Water Limits. Tran. ASAE 42: 1609-1614.

Schenk, A.F. 1989. Determination of DEM Using Iteratively Rectified Images. Photogrammetry Technical Report No 3. Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University. Columbus, Ohio.

Speight, J.G. 1974. A parametric approach to landform regions. In: E.H. Brown and D.L. Linton (eds.), The Progress of Geomorphology, 7: 213-230. The British Geographers.

Timlin, D.J., Y. Pachepsky, V.A. Snyder, and R.B. Bryant. 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. Soil Sci. Soc. Am. J. 62:764–773.

U.S. Geological Survey. 1987. Digital Elevation Models. Data Users Guide 5, National Mapping Program. Technical Instructions. Reston Virginia: U.S. Geological Survey.

Vertessy, R.A., J.T. Hatton, P.J. O'Shaughnessy, and M.D.A. Jayasuriya. 1993. Predicting water yield froma amountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. J. Hydrol. 150: 665-700.

Wang, M. and A.T. Hjelmfelt. 1998. DEM Based Overland Flow Routing Model. Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 3, No. 1: 1-8.

Weibel, R., and M. Heller. 1991. Chapter 19: Digital Terrain Modeling. In Goodchild, M.F. and D. Rhind (eds.), Geographic Information Systems, Principles and Applications. New York: Taylor and Francis.

Wilson J.P. and J.C. Gallant. 1996. EROS: a grid-based program for estimating spatially distributed erosion indices. Computers and Geosciences 22: 707-12

Wilson J.P. and J.C. Gallant. 1998. Terrain-based approaches to environmental resources evaluation. In S.N. Lane, K.S. Richards, and J.H.Chandler (eds). Landform Monitoring, Modelling, and Analysis. New York:Wiley, 219-40

Wilson J.P. and J.C. Gallant. 2000. Terrain Analysis: Principles and Applications. J.W. Wiley. Pp 469

Xu, T. 1999. Mapping Soil Properties with Landscape Analysis. Ph.D. Dissertation, Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, Canberra, A.C.T., Australia.

Young, R. A., C.A. Onstad, D.D. Bosch, and W.P. Anderson. 1996. AGNPS: A nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watersheds, Journal of Soil and Water Conservation, 44, 168-193.

EVALUATION OF THE EUROSEM MODEL FOR SIMULATING EROSION IN HILLY AREAS OF CENTRAL ITALY

VALUTAZIONE DEL MODELLO EUROSEM PER LA STIMA DELL'EROSIONE IN AREE COLLINARI DELL'ITALIA CENTRALE

Alexandra Rosenmund[1], Roberto Confalonieri[2]*, Pier Paolo Roggero[3], Marco Toderi[3], Marco Acutis[1]

[1]: Dipartimento di Produzione Vegetale, sezione di Agronomia, Università degli Studi di Milano, Via Celoria 2, 20133 Milano, Italy
[2]: Institute for the Protection and Security of Citizen, Joint Research Centre of the European Commission, AGRIFISH Unit, MARS-STAT Sector, TP 268 – 21020 Ispra (VA), Italy
[3]: Dipartimento di Scienze Ambientali e Produzioni Vegetali, Sezione di Agronomia, Università Politecnica delle Marche, Via Brecce Bianche, 60131 Ancona, Italy
**Corresponding author, Tel. +39-0332-789872, E-mail: roberto.confalonieri@jrc.it, Fax: +39-0332-789029*

Ricevuto 31 gennaio 2005, accettato 7 giugno 2005

Abstract
Erosion is one of the main factors involved in soil degradation, affecting 5-6 million hectares of soil every year. The consequent loss of the most fertile portion of the soil and surface water pollution present high economic and environmental costs for the community.
Central Italy, because of its characteristic geomorphology and the current prevailing land use options, can be considered a vulnerable area to soil erosion. In fact, the prevalence of clayey soils and cropping systems based on durum wheat, frequently in rotation with sunflower and other spring-summer crops, implies bare soil for many months and exposes it to considerable erosion risk.
In the last 15 years, physically-based models have been developed to analyze processes related to erosion and to compare alternative land management options in order to minimize the vulnerability of agricultural lands. In this study, the simulation model EUROSEM has been calibrated and validated using data collected during a 3-year period, in a basin in the province of Ancona (Central Italy). Data collected in 1998 (bare soil) were used for calibration; data from 1999 (sunflower) and 2000 (winter wheat) for validation. Average (of all the elements) calibrated values of saturated hydraulic conductivity (FMIN), effective net capillary drive (G), detachability of soil particles (EROD) and soil cohesion (COH) were, respectively, 1.8 mm h^{-1}, 346 mm, 2.4 g J^{-1} and 10 kPa.
The model has been shown to effectively simulate runoff and erosion in the evaluated conditions: the modelling efficiency is positive for the entire examined period and the relative root mean square errors (RRMSEs) computed on the cumulated values of 13 events are lower than 80%, both for runoff and erosion. In fact, although there is some imprecision in the simulation of single events, observed and simulated means of all erosion data are similar (respectively 1.53 and 1.14 t ha^{-1}), so that the model has been proven adequate for scenario simulations and for alternative management comparisons.

Keywords: Runoff, USLE, saturated hydraulic conductivity, CropSyst, hypodermic runoff, small catchment basin.

Riassunto
L'erosione è uno dei fattori più importanti tra quelli implicati nella degradazione dei suoli; interessa infatti 5-6 milioni di ettari di suolo ogni anno. La conseguente perdita della frazione più fertile del terreno, unitamente all'inquinamento delle acque superficiali, presenta elevati costi ambientali ed economici per la collettività.
L'Italia centrale, per le caratteristiche condizioni geomorfologiche e climatiche e per l'attuale uso del suolo, può essere considerata una zona vulnerabile per l'erosione del suolo. Infatti, l'ampia diffusione di terreni con tessitura argillosa e di sistemi colturali basati sull'avvicendamento di colture autunno – vernine (es. frumento duro) con colture primaverili – estive (es. girasole) comporta la presenza di suolo nudo per diversi mesi, aumentando notevolmente il rischio di erosione.
Negli ultimi 15 anni sono stati sviluppati modelli di simulazione a base fisica per analizzare i fenomeni legati all'erosione e per confrontare alternative gestionali a bassa vulnerabilità. In questo studio, è stato calibrato e validato il modello di simulazione EUROSEM su dati raccolti, per un periodo di 3 anni, nel sottobacino "Spescia", a Serra de' Conti (AN). I dati raccolti nel 1998 (suolo nudo) sono stati utilizzati per la calibrazione, quelli raccolti nel 1999 (girasole) e 2000 (frumento) per la validazione.I valori calibrati (medi per tutti gli elementi) di conducibilità idraulica satura (FMIN), tensione al fronte d'inumidimento (G), erodibilità (EROD) e coesività (COH) sono, rispettivamente, 1.8 mm h^{-1}, 346 mm, 2.4 gJ^{-1} and 10 kPa.

Il modello, nelle condizioni esplorate in questa ricerca, si è dimostrato in grado di simulare adeguatamente il deflusso superficiale e l'erosione: l'efficienza di modellizzazione, calcolata su tutto il periodo, è positiva ed i valori di RRMSE sono, sia per il deflusso che per l'erosione, sempre inferiori all'80%. Infatti, nonostante alcune imprecisioni nella simulazione dei singoli eventi, le medie di tutti i valori di erosione osservati e simulati sono simili (rispettivamente 1.53 e 1.14 t ha^{-1}): il modello ha dimostrato di poter essere utilizzato per la simulazione di scenari e per la valutazione di alternative gestionali.

Parole chiave: *Deflusso superficiale, USLE, conducibilità idraulica satura, CropSyst, deflusso sottosuperficiale, piccolo bacino*

Introduction

The evolution of modern management techniques has led to important increases in crop yields over the past thirty years. In several cases, above all in vulnerable areas, this process results from the adoption of high impact agronomic practices. The current situation is characterized by an ongoing loss of natural habitats and widespread soil degradation (Pierce *et al*., 1984; Bazzoffi, 2002). Oldeman (1994) estimated that 562 million hectares of soil (about 38% of the 1.5 billion hectares in cropland worldwide) had been degraded, by 1990, because of high – impact agrotechniques.
One of the most important problems related to hilly agroecosystems is the soil erosion due to surface runoff. Kendall and Pimentel (1994) emphasized that the processes involved in soil degradation are extremely rapid compared with pedogenetic ones. In fact, they calculated that 200 – 1000 years are needed to produce a 2.5 cm deep soil layer. The following data confirm the significance of the problem: erosion is the main component of soil degradation (explaining 84% of it) and, in the case of intensive agricultural systems, it may interest more than 60% of cultivated soils (Bazzoffi, 2002).
Erosion leads to direct and indirect problems: (i) reduced productivity because of the loss of the most fertile portion of the soil (ii) reduced surface water quality through nutrient transport and the deposition of sediments in lakes, estuaries and riverbanks. Both these consequences present high economic costs for the society.
De Ploey *et al*. (1991) estimated that in Europe, 25 million soil hectares of land are affected by erosion. The Mediterranean area can be considered particularly susceptible to soil erosion by water because of the aggressive rainfall, the peculiar geomorphology and the socio – economic situation which has recently characterized rural lands.
The implementation of the Common Agricultural Policy (CAP) has led to an increase in rotations based on durum wheat, sunflower and other spring-summer crops, which have replaced the extensive traditional systems based on livestock and forage crops like alfalfa (Arzeni *et al*., 2000). Deep ploughing in summer is the current practice in most hill areas of Central Italy based on such cropping systems, because of the soil's clayey texture and the resulting difficulty of growing a summer crop through sod seeding. Therefore, most of the arable lands are kept bare between the wheat harvest (June – July) and summer crop establishment (March – May), when rainfall intensity can be far higher than the infiltration rate, particularly if the soil structure is degraded by heavy rain splash and low organic matter content. As the deep clayey soil layers are almost impermeable, soil saturation frequently leads to landslides, which are prevented on hill slopes by drainage ditches placed along the maximum slope.
The evaluation of the impact of alternative management practices on soil erosion in order to identify possible conservation strategies can be carried out using two different approaches: (i) direct erosion measurements comparing different cropping systems (Roggero and Toderi, 2002b) and (ii) use of simulation models to compare alternative scenarios (Bazzoffi, 2002). The first option is, above all for large scale evaluations, costly and time consuming (Sharpley *et al*., 1995; Bockstaller *et al*., 1997), while the second requires reliable and sensitive models to estimate the expected effects of changes in physical characteristics and management practices with sufficient precision. Reliable field data are essential to calibrate and validate soil erosion models, which are generally used to (i) estimate erosion in relation to already existing combinations of factors (land use, soil type and morphology, meteorological conditions); (ii) evaluate the impact of contrasting land uses on erosion and sedimentation; (iii) contribute to the planning of adequate conservation strategies; (iv) interpret the physical processes involved.
More generally, the application of simulation models to complex systems (e.g. agroecosystems) has contributed to a holistic representation of these systems and hence to facilitating the decision-making processes involved in the management of natural resources (Pala *et al*., 1996).
Several soil erosion simulation models have been developed, characterized by different levels of complexity. They may be grouped in three categories: empirical models such as the USLE (Wischmeier and Smith, 1965; 1978) with the related MUSLE (Williams, 1975) and RUSLE (Renard *et al*., 1987, 1991); process-based models like ANSWERS (Beasley *et al*., 1980) and CREAMS (Knisel, 1980), which still contain empirical aspects; physical models, such as WEPP (Lane and Nearing, 1989), KINEROS (Woolhiser *et al*., 1990) and EUROSEM (Morgan *et al*., 1995).
Empirical models are based on data collected in standard plots and this limits their applicability outside the range of situations they were derived from. Frequently, empirical models outputs are based on yearly reports, which are inadequate to study the dynamic evolution of the physical processes and for the theoretic analysis of phenom-

ena, which is a relevant aspect for large-scale application (Lørup and Styczen, 1996).
Process-based models take into account the laws of conservation of mass and energy. Moreover, they describe the spatial variation of erosion and sedimentation. Nevertheless, they are still partially based on empirical rules and, for this reason, they present a weak theoretical structure (Elliot *et al*., 1994).
Physically based models consider and reproduce the main factors influencing erosion, their spatial and temporal variability and describe the interactions between them. All these models refer to a hydrological model and to a system of equations which schematize the evolution of each process. In this way, they are able to provide a spatially and temporally distributed simulation of processes, independently of the context in which they were calibrated (Lørup and Styczen, 1996). However, to do so, they require a number of measured or estimated parameters, which are subject to errors and bias. American mod els (WEPP or CREAMS) are based on continuous simulations in which changes in soil conditions are simulated starting from daily water balance computation. For this reason, these models require ample meteorological and land use data. Often, such a quantity of data is not available and, moreover, in Europe almost all erosion is caused by two or three events per year (Morgan *et al*., 1998).
KINEROS and EUROSEM are physical – distributed models able to simulate the effect of several variables related to hydrology and the sediment distribution for each event. Compared with other erosion models, EUROSEM has explicit simulation of interill and rill flow. EUROSEM has been already used and tested, at the plot or small catchment scale, in many countries (Albaladejo *et al*., 1994; Sardo *et al*., 1994; Botterweg *et al*., 1998; Morgan *et al*., 1998; Jetten *et al*., 1999; Strauss *et al*., 1999; Veihe *et al*., 2001; Cai *et al*., 2005). It proved accurate in estimating total runoff and erosion, although in some cases the results of single-event simulations were not completely satisfactory.
This paper reports some of the results emerging from the calibration and validation of the EUROSEM model using three years of field data on water runoff, land use and agro-techniques. Data were collected in the "Spescia" micro-catchment in the hills of the province of Ancona by the Agronomy research of SAPROV Department, partially published by Roggero and Toderi (2002a). These data were used for (i) the calibration of EUROSEM in order to provide a useful tool for a quantitative evaluation of the impact of contrasting management strategies and for (ii) the evaluation of the technical adequacy of EUROSEM in relation to the peculiar environmental characteristics of the region.

Materials and methods

Experimental data

The Spescia microcatchment is located in the municipality of Serra de' Conti in the province of Ancona (Central Italy). It is managed by three farmers, but the durum wheat – sunflower rotation occupies almost all the arable land. The most important consequence of this kind of land use is that all the surface is bare in autumn. The pluviometric regime is characterized by about 1000 mm average rainfall per year, with a maximum during the autumn and a minimum in July. The main characteristic of the microcatchment are: total surface = 80.8 ha; arable land = 70.3 ha; length = 1.35 km; width = 1.09 km; average slope = 7%; maximum slope = 25% (Roggero and Toderi, 2002a).
The analysis of pedologic profiles evidenced the presence of sub-superficial unstructured clay layers which may favor hypodermic water flow.
Systematic samplings of runoff water started in 1998 to quantify suspended particles, nitrates and soluble phosphorous. An automatic device for runoff measurement was installed downstream from the main ditch, coupled to an ISCO Area Velocity Flow Meter (Teledyne Isco, Inc., Lincoln, Nebraska, USA). Three 500 ml (10 subsamples × 50 ml) samples are collected every 4000 m^3 of runoff (corresponding to about 5 mm runoff).
An automatic Campbell (Campbell Scientific Ltd., Logan, Utah, USA) weather station is installed near the basin and records hourly temperature, humidity and rainfall, while wind and radiation data were interpolated based on data collected by adjacent stations.
Figure 1 shows the position of the points where soil data where collected.Results of analysis are reported in Tab 1.
The microcatchment topography and DEM (digital elevation model) had been measured by the SAPROV research team and all spatial data have been reported in a Geographic Information System (GIS) (Roggero and Toderi, 2002a).

Simulation model

EUROSEM (Morgan *et al*., 1998) is a dynamic distributed model, linked to the KINEROS hydrological model (Woolhiser *et al*., 1990), able to simulate the evolution of each of the plots of a catchment during a single storm by adopting a user-defined time step (usually between 30 and 180 seconds). The model uses rainfall measurements during a storm to calculate rainfall intensity and rainfall volume. The "rainfall data file" records, for each storm, the cumulative rainfall as a series of time-depth pairs. During the simulation, rainfall is first intercepted by the plant canopy and then split into direct throughfall and leaf drainage, and stemflow. After determining the kinetic energy of these components, EUROSEM calculates soil splash detachment and models infiltration in accordance with the numerical approach of Smith and Parlange (1978). Runoff is then routed over the soil surface using the kinematic wave equation accompanied by the modeling of soil erosion as a continuous exchange of particles between the flow and the soil surface. Soil loss is computed as a sediment discharge, based on the dynamic mass balance equation. The main model outputs are total runoff, total soil loss, the storm hydrograph and

storm sediment graph. An accurate description of the model is provided by Morgan *et al*. (1998).

Model parameterization and validation

EUROSEM simulates erosion by resolving the catchment into elements representing planes or channels. To get this representation of the catchment, contour lines were visualized on a map showing the actual land use and the catchment hydrography. In this way, possible abrupt changes in slope have been represented as a succession of planes in which the flow follows a cascade course. Successively, the DEM allowed a precise individuation of surface flow directions. In this way, the whole catchment surface has been divided into elements which are homogeneous for land use, hydrology and soil properties (Figures 2.a and 2.b).

The parameters describing soil hydraulic properties (soil water content at saturation [SWCs; m^3 m^{-3}], porosity [POR; m^3 m^{-3}], fraction of skeleton per soil volume [ROC; m^3 m^{-3}], saturated hydraulic conductivity [FMIN; mm h^{-1}], effective net capillary drive [G; mm] and Manning's number [n; $m^{1/6}$]) were set by using (i) direct measurement; (ii) pedotransfer function (using soil organic matter and texture data as input for the software SOILPAR 2.00; Acutis and Donatelli, 2003) or (iii) the values tabled in the EUROSEM user's manual.
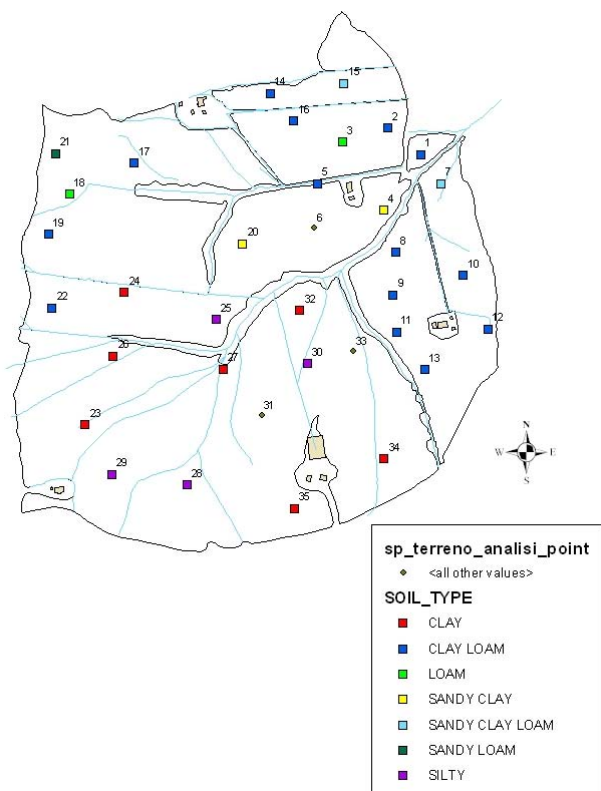
Fig. 1 - The Spescia catchment (Ancona Province, Central Italy). The squares indicate where soil analysis were carried out and their labels correspond to Table 1

Fig. 1 - *Il bacino Spescia (AN). I quadrati indicano i punti nei quali sono stati prelevati campioni di suolo per le analisi; i numeri in corrispondenza dei quadrati si riferiscono agli ID di Tabella 1*
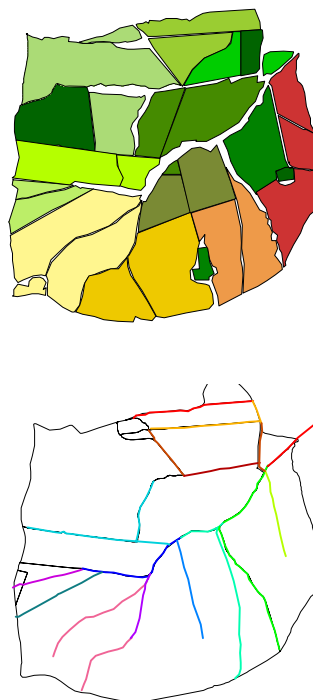
Fig. 2 - Resolution of the Spescia catchment into homogeneous elements. (a) planes; (b) channels

Fig. 2 - *Suddivisione del bacino Spescia in elementi omogenei. (a) piani; (b) canali*

Tab. 1 - Some results of the analysis carried out on the samples collected in the points evidenced in Figure 1. Spescia basin (Ancona Province, Central Italy)

Tab. 1 - *Alcuni dei risultati delle analisi dei campioni di suolo raccolti nei punti evidenziati in Figura 1. Bacino Spescia (Provincia di Ancona, Centro Italia)*

ID	sand (%)	silt (%)	clay (%)	organic matter (%)	soil type
1	40.5	30.0	29.5	1.5	C L
2	38.6	28.6	32.8	1.7	C L
3	44.4	28.2	27.4	1.0	L
4	49.5	24.4	26.1	1.5	Sa C
5	28.9	31.6	39.5	1.3	C L
7	46.7	23.9	29.4	1.3	Sa C L
8	44.4	26.3	29.3	1.6	C L
9	30.7	33.6	35.7	1.8	C L
10	34.6	31.0	34.4	1.5	C L
11	23.9	36.3	39.8	0.7	C L
12	33.7	31.5	34.8	1.6	C L
13	27.5	33.5	39.0	1.0	C L
14	41.4	29.3	29.3	0.6	C L
15	52.6	24.8	22.6	0.6	Sa C L
16	37.3	30.1	32.6	1.0	C L
17	38.7	27.9	33.4	1.3	C L
18	44.4	29.1	26.5	0.7	L
19	29.6	34.0	36.4	0.6	C L
20	50.7	24.8	24.5	0.9	Sa C
21	60.6	20.1	19.3	0.9	Sa L
22	29.7	33.8	36.5	0.9	C L
23	20.6	36.9	42.5	0.8	C
24	22.3	35.2	42.5	1.0	C
25	13.2	38.9	47.9	1.4	Si C
26	21.5	36.7	41.8	1.4	C
27	21.3	35.6	43.1	1.4	C
28	15.4	40.3	44.3	1.3	Si C
29	16.9	40.7	42.4	1.3	Si C
30	17.3	40.4	42.3	1.4	Si C
32	18.6	38.3	43.1	1.6	C
34	19.3	36.9	43.8	1.5	C
35	17.0	38.2	44.8	1.0	C

For each storm, the initial soil water content (SWCi; $m^3 m^{-3}$) was set by using the value simulated by CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003), parameterized for the situation which characterized the Spescia basin in the period 1998-2000. To parameterize the variation in time of the ratio of the straight line distance between two points on the ground to the actual distance measured over all the microtopographic irregularities (RFR), the indirect procedure (based on the kinetic energy of the raindrops) proposed by the user's manual was followed.
The parameters describing erodibility (measure of the soil particles detached by the splash effect [EROD; g J^{-1}] and soil cohesion [COH; kPa]) were set by using tabled values.
Parameters describing the canopy evolution through the season (e.g. proportion of soil covered by the vegetation [COVER; %], maximum water quantity intercepted by the vegetation [DINT; mm]) were set by combining information from (i) the tabled values for full-canopy stage and (ii) the leaf area index simulated by CropSyst with a daily time step. In this way, a dynamic representation of the canopy-related variables was obtained.
A two-steps sensitivity analysis was carried out to individuate the parameters with the higher influence on model outputs using data from the first measured storm, which occurred on 11 November 1998. During the first step, the parameters involved with runoff and erosion were varied (percentage variations within a range derived from the literature), for all the elements of the catchment. During the second step, the parameters with the higher influence (individuated in the first step) were co-varied and the simulated runoff was plotted in a diagram to identify the combinations producing maximum and minimum (Figure 5). This permitted the carrying out a kind of guided calibration. In fact, the model presented a remarkable underestimation both for runoff and erosion before the calibration. This procedure allowed researchers to begin the calibration by taking as the starting point the combination for which the model simulated appropriate erosion values.
Data from the storm events occurred in 1998 (four events) were used for calibration while the data from the other two years were used to validate the calibrated parameters. The correspondence between observed and predicted values was expressed by using the indices proposed by Loague and Green (1991) and recently reviewed by Martorana and Bellocchi (1999) and Donatelli *et al.* (2003): the relative root mean squared error (RRMSE, minimum and optimum=0%, equation [1]), the coefficient of determination (CD, minimum=0, optimum=1, indicates whether the model reproduces the trend of measured values or not, equation [2]), the modelling efficiency (EF, -∞ ÷ 1, optimum=1, if positive, indicates that the model is a better predictor than the average of measured values, equation [3]), the coefficient of residual mass (CRM, -∞-+∞, optimum=0, if positive indicates model underestimation, equation [4]) and the parameters of the linear regression equation between ob-
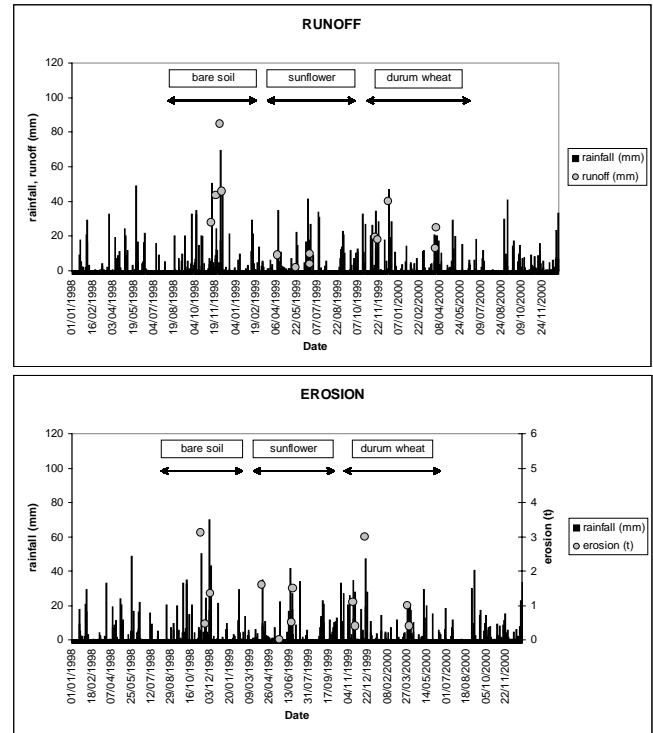
Fig. 4 - Measured (a) runoff and (b) erosion in relation to rainfall data for the period 1998 – 2000

Fig. 4 - *Valori misurati di (a) deflusso ed (b) erosione in relazione alle precipitazioni per il periodo 1998 – 2000*

served and predicted values.The equations of the indices are:

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Si - Oi)^2}{n}} \times \frac{100}{\overline{O}} \qquad [1]$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(S_i - \overline{O}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \overline{O}\right)^2} \qquad [2]$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \overline{O}\right)^2 - \sum_{i=1}^{n}\left(S_i - O_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \overline{O}\right)^2} \qquad [3]$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n}O_i - \sum_{i=!}^{n}S_i}{\sum_{i=1}^{n}O_i} \qquad [4]$$

where S_i are the simulated values; O_i are the observations; $\overline{O}$ is the average of observed values; n is the number of evaluated cases. The model's performance for each of the three years was also compared to the results

obtained using the USLE approach (Wischmeier and Smith, 1965; 1978).

Results and discussion

Experimental results

In the monitored period, important storm events took place in the autumn of 1998 and 1999 and in June 1999. The year 2000 was characterized by drought during spring and summer and by light rainfall during the autumn. Details about runoff and erosion data in the Spescia basin during the studied period are discussed in depth by Roggero and Toderi (2002a). Figure 3 shows long term average rainfall data compared with data measured in the studied period. Figure 4 shows runoff (4.a) and erosion (4.b) in relation to rainfall data.

Model results

Calibration of the parameters involved in runoff

The first part of the sensitivity analysis (carried out varying the parameters one by one) resulted in the selection of FMIN and G as the parameters with the highest influence on runoff. The same two parameters had been already individuated by the other sensitivity analyses of EUROSEM (e.g. Veihe and Quinton, 2000; Veihe *et al*., 2000). Their combined effect (obtained by co-varying their values) on simulated runoff was then analyzed
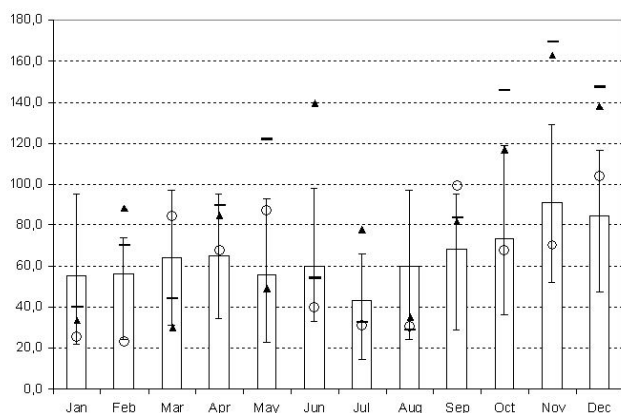
Fig. 3 - Long term average rainfall data compared to 1998 ("minus" symbol), 1999 (black triangle) and 2000 (white circle) data

Fig. 3 - *Dati medi di precipitazione a confronto con i dati rilevati nel 1998 (trattino), 1999 (triangolo nero) and 2000 (cerchio bianco)*

(Figure 5). This representation identified the combinations of the two parameters corresponding to high runoff values and permitted a calibration using this kind of map. The calibrated values for FMIN (between 0.25 and 3.25 mm h^{-1}) are 5% of the values obtained, for each element, with the pedotransfer function developed by Wösten *et al*. (1998) based on the Hypress database for European soils. Although this percentage may appear low, the cali-
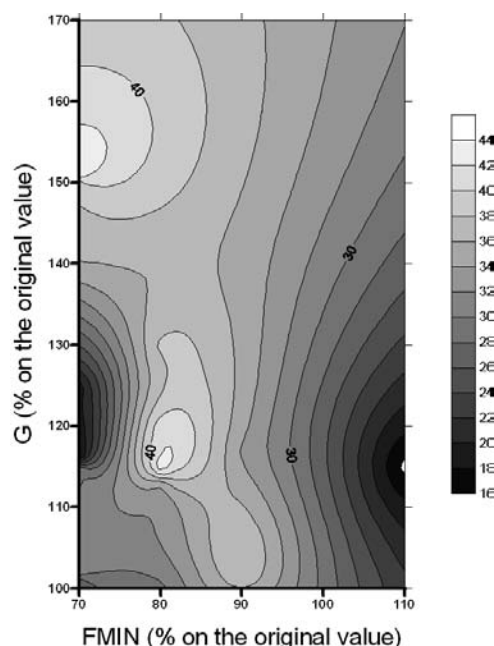
Fig. 5 - Sensitivity analysis (carried out on data from the storm occurred in 11 November 1998). Effects of the co-variation of the parameters FMIN and G (plotted on the two axis) on runoff (mm; represented with contour lines)

Fig. 5 - *Analisi di sensitività (condotta sui dati rilevati nel corso dell'evento temporalesco del 11 novembre 1998). Effetti della co-variazione dei parametri FMIN e G (disposti sui due assi) sul deflusso (mm; rappresentato da curve di livello)*

brated values for FMIN are always inside the range of values tabled in the EUROSEM manual. Moreover, other authors considered, for FMIN and the same textural classification of the soil, ranges of values that include the ones calibrated in this study (e.g. Tiscareno-Lopez *et al*., 1993; Veihe and Quinton, 2000; Paz Gonzales *et al*., 2003). This may be explained (i) by the high errors in the pedotransfer function for estimating saturated hydraulic conductivity, that are typically of one order of magnitude and (ii) by the fact that the real value of FMIN reduces, by sealing and changes in microtopography, during a single event (Torri *et al*., 1999), on bare soil due to raindrop impact that deteriorates the surface structure and after tillage due to sub-soil layers compaction. At the end of the calibration, the values of G range between 188 and 445 mm. These values are in agreement with the ones reported by Veihe and Quinton (2000).

Calibration of the parameters involved with erosion

The calibrated values of EROD (between 1.9 and 3g J^{-1}) are close to the highest tabled in the EUROSEM user's manual for the same texture classes and are consistent with the values determined by Poesen (1986).

For the parameter COH a unique value was calibrated (10 kPa, close to the lowest values of the EUROSEM manual) for all the elements. This value is included in the range of values reported by Folly (1997). Figure 6 (data from 1998) and Table 2 show EUROSEM performances
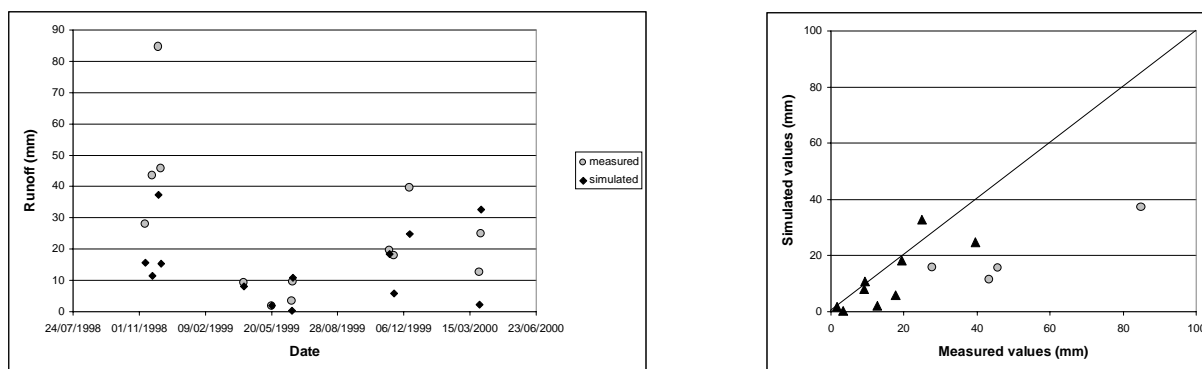
Fig. 6 - Measured and simulated runoff data (cumulated for each event). Evolution in time of the values after calibration (1998) and after validation (1999-2000) (a); measured (X-axis) and simulated (Y-axis) values. Comparison with the y = x ideal function (b)

Fig. 6 - *Valori misurati e simulati di deflusso (totali per evento) a fine calibrazione (1998) e dopo la validazione (1999-2000) (a); confronto con la retta ideale y + x (b; cerchi grigi: calibrazione; triangoli neri: validazione)*

after calibration. It is possible to notice a general model underestimation that we have not corrected with calibration, considering that the model does not include algorithms for the simulation of hypodermic runoff and for water redistribution in soil between two close events. This is also the reason for the unsatisfactory indices of agreement. Because of this consideration, some authors (Folly *et al*., 1999) have already underlined the partial inadequacy of EUROSEM in simulating runoff during long events characterized by more than one peak of rainfall intensity.

Figure 7 (data from 1998) and Table 2 shows the results of erosion simulations. We can observe a generally low agreement between estimated and measured values. Often, over and underestimations compensated each other, producing better fitting indices compared to the ones computed for runoff (EF is positive, parameters of the linear regression equation between observed and predicted values are quite satisfactory, observed and estimated means are close).

Validation

Validation of the parameters involved with the simulation of runoff and erosion is shown in Figures 6 and 7 (data from 1999 and 2000) and in Table 2. Above all for data collected during 1999, the model accurately reproduced both the phenomena. Observed runoff data from 1999 are always reliably reproduced, like the corresponding erosion values (RRMSE = 51.7%, EF, CD and Slope very close to 1, high R^2 and very similar observed and estimated means). For 2000, model results are satisfactory. Considering the complexity (i) of the simulated processes and (ii) of the studied basin, these results are considered encouraging.

Tab. 2 - Indices of agreement between observed and simulated runoff and erosion data

Tab. 2 - *Indici per la valutazione dell'accordo tra dati osservati e simulati di deflusso ed erosione*

	index	RRMSE (%)	EF	CNR	CD	SLOPE	Intercept*	R^2	Signif.	Obs. Mean*	Esti Mea
	Minimum	0.00	-inf.	-inf.	0.00	-inf.	-inf.	-inf.			
	Maximum	+inf.	1.00	+inf.	+inf.	+inf.	+inf.	+inf.			
	Optimal	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00			
C[§]	Erosion 1998	83.19	0.48	0.21	0.30	1.44	-0.24	0.56	0.09	1.73	1.3
	Runoff 1998	65.44	-1.48	0.61	2.36	1.87	13.32	0.82	0.09	50.50	19.9
V[§§]	Erosion 1999	51.65	0.80	0.30	0.82	1.08	0.15	0.87	0.01	0.60	0.4
	Runoff 1999	79.67	-0.11	0.17	0.92	0.47	0.71	0.19	0.28	1.15	0.9
	Erosion 2000					not available					
	Runoff 2000					not available					
T[§§§]	Erosion 1998/2000	79.92	0.30	0.25	0.42	1.02	0.36	0.37	0.03	1.53	1.1
	Runoff 1998/2000	74.42	0.22	0.46	0.55	1.50	4.84	0.58	0.00	26.12	14.1

[§]:Calibration; [§§]:Validation ; [§§§]: Total ; *: for runoff data:mm; for erosion data: t

Comparison with USLE results

Figure 8 shows the annual values of erosion measured, simulated by EUROSEM and estimated with the USLE approach. The USLE estimations are always remarkably high compared with observed data, while the values simulated by EUROSEM are very close to the observed ones for 1998 (observed = 10.38 t ha^{-1} $year^{-1}$; simulated = 8.22 t ha^{-1} $year^{-1}$) and 1999 (observed = 9.22 t ha^{-1} $year^{-1}$; simulated = 7.61 t ha^{-1} $year^{-1}$) and slightly overestimated for 2000 (observed = 1.4 t ha^{-1} $year^{-1}$; simulated = 3.57 t ha^{-1} $year^{-1}$).

These results confirm the inadequacy of the USLE for the Italian Mediterranean environment, already noted by Zanchi (1988). The empirical base of the USLE in the description of the processes and their coefficients generates errors outside the USA, where the coefficients were calibrated.
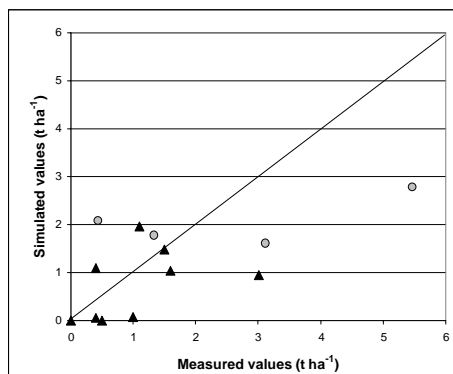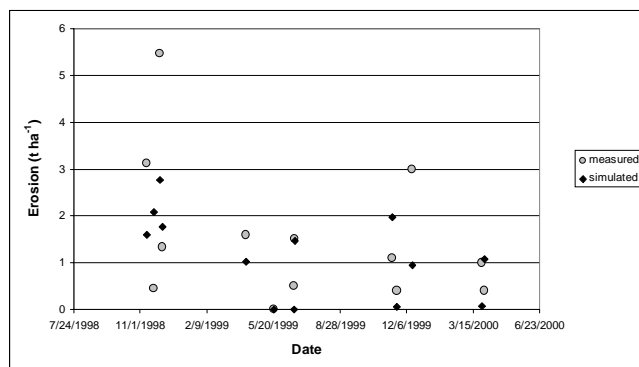
Fig. 7 - Measured and simulated erosion data (cumulated for each event). Evolution in time of the values after calibration (1998) and after validation (1999-2000) (a); measured (X-axis) and simulated (Y-axis) values. Comparison with the y = x ideal function (b)

Fig. 7 *- Valori misurati e simulati di erosione (totali per evento) a fine calibrazione (1998) e dopo la validazione (1999-2000) (a); confronto con la retta ideale y = x (b; cerchi grigi: calibrazione; triangoli neri: validazione))*

Conclusions

Although simulated runoff values are not always satisfactory for single events, the model has shown itself to be adequate for simulating hydrological phenomena for a complex system like the one examined in this study. Today, with soil maps, the use of GPS and GIS and greater availability of meteorological data in electronic format, along with improved measuring techniques and pedotransfer functions, data availability is more and more infrequently a major limitation to the applicability of a physical model.

The presence of hypodermic runoff, in case of long events with periods of low rainfall intensity, should explain the observed model underestimation. Other authors have already underscored this discrepancy in the simulation of processes related to water loss from the system (Folly *et al*., 1999; Veihe *et al*., 2001).

Because hydrological processes causing erosion are typically occasional and not continuous, empirical approaches (e.g. USLE) based on just a few years are not sufficient for long-term quantification of erosion and to select agronomical options for its mitigation. EUROSEM, on the contrary, has proven accurate in reproducing annual runoff and erosion dynamics in the environmental conditions of Central Italy. On the basis of the available data, EUROSEM results were well differentiated between different soil cover types (crops [validation] or bare soil [calibration], and within the same crop, vegetative stages) and were able to take into account specific meteorological phenomena within each year, while also proving itself a useful tool for testing the effects of different climatic and management scenarios

Fig. 8 - Yearly observed erosion values compared with the ones simulated by EUROSEM and estimated with the USLE approach

Fig. 8 *- Figura 8. Valori annuali di erosione osservati, simulati da EUROSEM e stimati con USLE*

Acknowledgments

This study was funded by the Italian Ministry of Agricultural and Forestry Policies, Finalised Project "Climagri", subproject 2 Climate change and agriculture, Research Unit Dipartimento di Scienze Ambientali e delle Produzioni Vegetali, Sez. Agronomia e coltivazioni erbacee, Scientific coordinator: Pier Paolo Roggero

References

Acutis, M., Donatelli, M., 2003. SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. European Journal of Agronomy, 18, 373-377.

Albaladejo, J., Castillo, V., Martinez-Mena, M., 1994. EUROSEM: preliminary validation on non-agricultural soils. In: Rickson, R. (Ed), Conserving Soil Resources: European Perspectives. Wallingford, UK, pp. 314-325.

Arzeni, A., Esposti, R., Solustri, A., 2000. Il sistema agricolo ed alimentare nelle Marche. Franco Angeli, Milano, 352 pp.

Kendall, C., Pimentel, D., 1994. Constraints on the expansion of the global food supply. Ambio, 23, 198-205.

Bazzoffi, P., 2002. Impact of human activities on soil loss. Direct and indirect evaluation. In: Pagliai M., Jones R. (Eds), Sustainable Land Management – Environmental Protection. A Soil Physical Approach. Advances in Geoecology, 35, Reiskirchen Catena Verlag, 427-440.

Beasley, D.B., Huggins, L.F., Monke, E.J., 1980. ANSWERS – a model for watershed planning. Transaction of ASAE, 23, 938-944.

Bockstaller, C., Girardin, P., van der Werf, H.M.G., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. European Journal of Agronomy, 7, 261-270.

Botterweg, P., Leek, R., Romstad, E., Vatn, A., 1998. The EUROSEM-GRIDSEM modelling system for erosion analyses under different natural and economic conditions. Ecological Modelling, 108, 115-129.

Cai, Q.G., Wang, H., Curtin, D., Zhu, Y., 2005. Evaluation of the EUROSEM model with single event data on Steeplands in the Three Gorges Reservoir Areas, China. Catena, 59, 19-33.

De Ploey, J., Imeson, A., Oldeman, L.R., 1991. Soil erosion, soil degradation and climatic change. In: Land Use Changes in Europe, F.M. Brower, A.J. Thomas, M.J. Chadwick (Eds), Kluwer Academic Publisher, London.

Donatelli, M., Acutis, M., Danuso, F., 2003. Valutazione dei modelli di simulazione. In: Quaderni del progetto PANDA "Mobilità dei prodotti fitosanitari nel suolo" a cura di Capri, E., Francaviglia, R. (estratto da Agricoltura e Ricerca n 190), 75-97.

Elliot, W.J., Foltz, R.B., Remboldt, M.D., 1994. Predicting sedimentation from roads and streams crossing with the WEPP model. Presented at the 1994 ASAE International Winter Meeting. Paper No. 947511. St. Joseph, MI: ASAE.

Folly, A., 1997. Land use planning to minimize soil erosion – a case study from the upper East Region in Ghana. Geographica Hafniensia A6. PhD Thesis, Publications, Institute of Geography, University of Copenhagen, Denmark.

Folly, A., Quinton, J.N., Smith, R.E., 1999. Evaluation of the EUROSEM model using data from the Catsop watershed, The Netherlands. Catena, 37, 507-519.

Jetten, V., de Roo, A., Favis,-Mortlock, D., 1999. Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models. Catena, 37, 521-541.

Kendall, H.W., Pimentel, D., 1994. Constraints on the expansion of the global food supply. Ambio, 23, 198-205.

Knisel, W.G., 1980. CREAMS: a field-scale model for chemical, runoff, and erosion from agricultural management systems. Conservation Report No. 26. USDA. Science Education Administration.

Lane, L.J., Nearing, M.A. (Eds), 1989. USDA-Water Erosion Prediction Project: hillslope profile model documentation. National Soil Erosion Research Laboratory Report No. 2 (USDA-ARS: W. Lafayette, IN.).

Loague, K.M., Green, R.E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. Journal of Contaminant Hydrology, 7, 51-73.

Lørup, J.K., Styczen, M., 1996. Soil erosion modelling. In: Abbot, M.B., Refsgaard, J.C. (Eds), Distributed hydrological modelling, Kluwer Academic Publisher, pp. 93-120.

Martorana, F., Bellocchi, G., 1999. A review of methodologies to evaluate agroecosystems simulation models. Italian Journal of Agronomy, 3, 19-39.

Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E., Folly, A.J.W., 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. Earth Surface Processes and Landforms, 23, 527-544.

Oldeman, L.R., 1994. The global extent of soil degradation. In: Greenland, D.J., Szaboles, T. (Eds.), Soil Resilience and Sustainable Land Use, Wallingford, Commonwealth Agricultural Bureau International, http://www.isric.nl/GLASOD.htm

Pala, M., Stöckle C.O., Harris, H.C., 1996. Simulation of durum wheat (Triticum turgidum ssp. Durum) growth under differential water and nitrogen regimes in a Mediterranean environment using CropSyst, Agricultural Systems, 51:2, 147-163.

Paz Gonzáles, A., Diaz-Fierros Viqueira, F., Soto Gonzáles, B., López Periago, E., 2003. Uso de un modelo basado en eventos para evaluar la conductividad hidráulica en una cuenca de pequeñas dimensiones. In: J. Alvarez-Benedi and P. Marinero (Eds), Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Actas de la VI jornadas sobre investigacion de la zona no saturada del suelo. (http://www.zonanosaturada.com/publics/V6/indice6.html)

Pierce, F.J., Larson, W.E., Dowdy, R., 1984. Soil loss tolerance: maintenance of long-term soil productivity. Journal of Soil and Water Conservation, 39, 136-138.

Poesen, J., 1986. Field measurements of splash erosion to validate a splash transport model. Zeitschrift für Geomorphology N.F. Supplement-Band, 58, 81-91.

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1987. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised soil loss equation (RUSLE). U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Handbook No. 703, 404 pp.

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., Porter, J.P., 1991. RUSLE: revised universal soil loss equation. Journal of Soil and Water Conservation, 46, 30-33.

Roggero, P.P., Toderi, M. (Eds.), 2002a. Le misure agroambientali: applicazioni nelle Marche e analisi di un caso di studio sull'inquinamento da nitrati di origine agricola. Quaderni 5B, Assam, Ancona, 339 pp.

Roggero, P.P., Toderi, M., 2002b. Impact of cropping systems on soil erosion in the clay hills of central Italy. In: Pagliai M., Jones R. (Eds), Sustainable Land Management – Environmental Protection. A Soil Physical Approach. Advances in Geoecology, 35, Reiskirchen Catena Verlag, 471-480.

Roggero, P.P., Acutis, M., Ciarapica, L., Donatelli, M., Toderi, M., Zinoni, F., 2003. Impatto ambientale dei sistemi colturali in aree di collina, in relazione ai cambiamenti climatici. Proceedings of the Workshop "CLIMAGRI – Cambiamenti Climatici e Agricoltura", Cagliari, Italy, 16-17 January 2003.

Sardo, V., Vella, P., Zimbone, S., 1994. Indagine sperimentale per la validazione del modello EUROSEM per la previsione dell'erosione idrica superficiale. Rivista di Agronomia, 28, 400-406.

Sharpley, A.N., 1995. Dependence of runoff phosphorous on extractable soil phosphorous. Journal of Environmental Quality, 24, 920-926.

Smith, R.E., Parlange, J.Y., 1978. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. Water Resources Research, 14, 533-538.

Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. European Journal of Agronomy, 18:3/4, 289-307, Second special issue "2nd International Symposium on Modelling Cropping Systems - Florence, Italy".

Strauss, P., Konecny, F., Blum, W.E.H., 1999. A rainfall generation procedure for Soil Erosion Model (EUROSEM). Hydrol. Earth Syst. Sci., 32, 213-222.

Tiscareno-Lopez, M., Lopes, V.L., Stone, J.J., Lane, L.J., 1993. Sensitivity analysis of the WEPP watershed model for rangeland applications. I: hillslope processes. Transactions of the ASAE, 36, 1659-1672.

Torri, D., Regüés, D., Pellegrini, S., Bazzoffi, P., 1999. Within-storm soil surface dynamics and erosive effects of rainstorms. Catena, 32, 131-150.

UNEP, 1997. World Atlas of Desertification. London, Arnold Publisher Ltd.

Veihe, A., Quinton, J., 2000. Sensitivity analysis of EUROSEM using Monte Carlo simulation. I: hydrological, soil and vegetation parameters. Hydrological Processes, 14, 915-926.

Veihe, A., Quinton, J., Poesen, J., 2000. Sensitivity analysis of EUROSEM using Monte Carlo simulation. II: the effect of rills and rock fragments. Hydrological Processes, 14, 927-939.

Veihe, A., Rey, J., Quinton, J.N., Strauss, P., Sancho, F.M., Somaribba, M., 2001. Modelling of event-based soil erosion in Costa Rica, Nicaragua and Mexico: evaluation of the EUROSEM model. Catena, 44, 187-203.

Williams, J.R., 1975. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. ARS.S-40, US Gov. Print Office, Washington, D.C., 244-252.

Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1965. Rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Agriculture Handbook No 282, U.S. Dept. of Agric. Washington, D.C.

Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA. AH537. Washington, D.C.

Woolhiser, D.A., Smith, R.E., Goodrich, D.C., 1990. KINEROS: a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. USDA Agricultural Research Service ARS-77.

Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A., Le Bas, C., 1998. Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation models in environmental studies and in land use planning. Report 156, Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands.

Zanchi, C., 1988. The cropping pattern and its role in determining erosion risk: experimental plot results from the Mugello valley (central Italy). In: Sediment Budgets. M.P. Bordas and D.E. Walling (eds.). IAHS Publication No. 174. Int. Assoc. Hydrol. Sci., Wallingford, UK.

CLIMATOLOGY OF NORTH FÖHN IN CANTON TICINO AND WESTERN LOMBARDY

CLIMATOLOGIA DEL FÖHN SETTENTRIONALE IN CANTON TICINO E IN LOMBARDIA OCCIDENTALE

Paolo Ambrosetti[1], Luigi Mariani[2]*, Piero Scioli[3]

[1]: *MeteoSvizzera, via ai Monti, 146, CH – 6605 Locarno-Monti*
[2]: *Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Produzione Vegetale, Via Celoria 2, 20100 Milano MI*
[3]: *Osservatorio Meteorologico di Castellanza, via Testori, 38, 21053 Castellanza VA*
* *Corresponding author e-mail: meteomar@libero.it*

Ricevuto 31 gennaio 2005, accettato 7 giugno 2005

Abstract
The analysis of yearly, seasonal and monthly frequency of north föhn in the Po valley was carried out considering some stations located in western Lombardy (Italy) and in Canton Ticino (Switzerland) and adopting synoptic, mesoscale and punctual (single station's) recognition criteria. The results show a gradual reduction of föhn frequency with increasing distance from the Alpine watershed but a relevant presence of this wind is shown also in the low plain. A simple linear model able to describe the mean number of days with föhn on the Southern of the Alps as a function of the distance from the Alpine watershed is also discussed. A change point in 1988 was detected by means of the statistical analysis of föhn time series of Locarno-Monti; this change point is coherent with discontinuities in other climatic variables detected by other authors and that can be seen as symptoms of a climatic change happened in Europe in '80 years of XXth century. The time series 1988-2003 present a reduction of föhn yearly events with a parallel increase of the Winter percentage contribution to the yearly total

Keywords: catabatic wind, Alps, climatology, climatic change, weather types, North Atlantic Oscillation (NAO).

Riassunto
Viene condotta un'analisi della frequenza mensile, stagionale ed annuale del föhn nel bacino del Po con riferimento specifico a stazioni della Lombardia occidentale (Italia) e del Canton Ticino (Switzerland) adottando criteri sinottici, di mesoscala e puntuali (riferiti cioè alla singola stazione). I risultati mostrano una graduale riduzione della frequenza del föhn al crescere della distanza dello spartiacque alpino ma una rilevante presenza di tale vento si mantiene anche nella bassa pianura. Un semplice modello lineare utile per descrivere il numero medio di giorni di föhn al sud delle Alpi in funzione della distanza dallo spartiacque alpino viene altresì discusso. L'analisi delle serie storiche di Locarno-Monti mostra una discontinuità nel 1988 che appare coerente con analoghi fenomeni osservati da vari autori in altre variabii climatiche e che possono essere considerati sintomi di un cambiamento climatico che ha avuto luogo in Europa negli anni 80. La serie storica dal 1988 al 2003 presenta, rispetto a quella precedente, riduzione dei giorni annui di föhn con un parallelo aumento del contributo percentuale dei casi invernali al totale annuo.

Parole chiave: *vento catabatico, Alpi, climatologia, cambiamento climatico, tipi di tempo, Oscillazione Nordatlantica (NAO).*

Introduction

The German word "Föhn" was originally reserved to the strong, warm and very dry wind descending the Alps north slopes (south föhn) (Monkhouse, 1970, Schrott and Verant, 2004) and by extension has been applied to the wind with similar properties descending the Southern side of the Alps and affecting Swiss and Italian area (north föhn). In some valleys of the Alps this wind is named "favonio", probably deriving from the Latin word favonium, which defined a westerly wind sometimes identified with zephyrum *(L. A. Seneca, Naturales questiones, V, 16, 5).*

This work focuses on the study of Alpine föhn episodes in some stations of the Po basin located in Italy (western Lombardy) and Switzerland (Canton Ticino). The Po basin (figure 1) is a wide area surrounded to the north and west by the Alps (mean height: 2000 - 3000 m a.s.l.) and to the south by the Apennines (mean height: 800 m a.s.l.). This basin is opened towards the east to the Adriatic Sea, while the Apennines separate it from the Mediterranean Sea (Genoa Gulf). The interaction of geographic features with the general circulation has an important effect on the climatology of the area. In particular the wind field of the Po valley is affected by the strong interaction between the low- and mid–
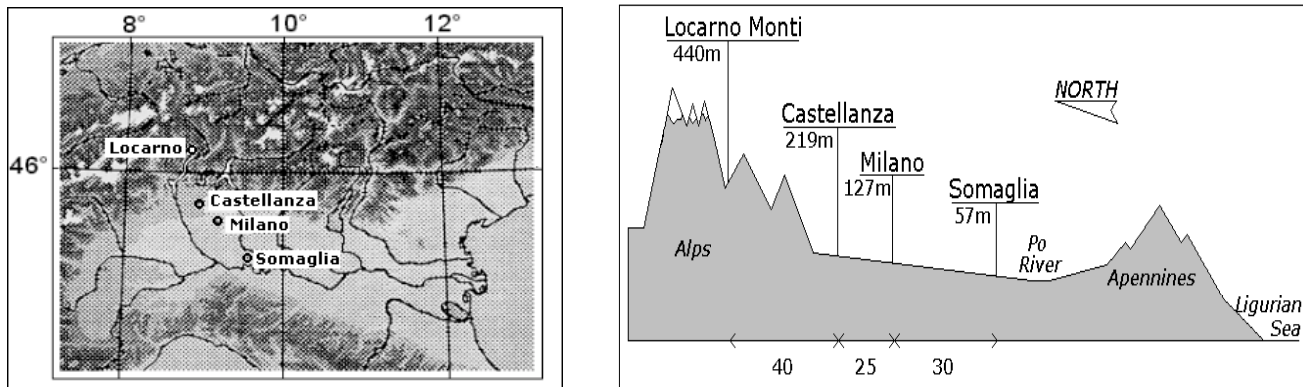
Fig. 1 - Map and cross section with stations used for analysis of föhn climatology. The North-South components of the distances among stations (km) are written on the bottom of the cross section

Fig. 1 *– Mappa e sezione verticale che mostrano le stazioni usate per l'analisi climatologica del föhn. Le componenti Nod-Sud delle distanze fra le stazioni (km) sono riportate alla base della sezione.*

tropospheric flows and the Alpine range that produce north föhn (Binder and Schar, 1996). The Po Valley is sometimes influenced by south föhn blowing from the Apennines; however the low altitude of this mountain range causes weaker föhn episodes than the Alpine ones.
The föhn warming is often the product of the following mechanism (Fea, 1988): the surface air rises and then falls almost symmetrically on its passage over mountain range; if water vapour condensates and precipitation falls from it on the windward slopes, then its warming by descent (mostly at the dry adiabatic lapse rate) exceeds its cooling by ascent (mostly at the saturated adiabatic lapse rate) and net warming is therefore to be expected.
This is at least a contributory factor in some occurrences of föhn. It is not, however, a necessary condition: there are occasions when appreciably warmer air is present on the leeward than to windward yet the air is so dry that not even cloud is formed by ascent. In this case the explanation of such warming is that the air which reaches the ground in the lee of the mountains was, on the upwind side, at a higher level than the surface (Barry, 1992; Mc Intosh and Thom, 1972).
In the evolution of single föhn episodes are important some different effects like friction due to the surface characters or channelling in longitudinal valleys.

Tab. 1 – Meteorological stations used for this work

Tab. 1 – *Stazioni meteorologiche utilizzate per questo lavoro*

Station	Height (m)	Distance from Alpine watershed (km)	Propriety
Locarno-Monti	440	70	MeteoSvizzera
Castellanza	219	110	Osservatorio Meteorologico di Castellanza
Milano	127	135	Luigi Mariani
Somaglia	57	165	Ersaf
Spessa	61	162	Ersaf – Sig. Perucchini

Föhn is a very turbulent wind, especially at the onset. During the descent in a valley it increases the speed like a water wave passing over a dam. The strong gusts may seriously affect the stability of buildings and structures like domes, hangars and bridges (Cowan, 1978).
Well known are the effects of föhn on human health, due to the abrupt thermal and hygrometric variations, the changes in the ionic equilibrium of the air and the high-frequency mini-variation of air pressure (Richner, 1974).
Very important are the effects of föhn on Alpine ecosystems and in particular: enhanced stress conditions for domestic animals with loss of dairy and meat productions (Innis, 1978), stress symptoms for natural and cultivated plants (strong evapotranspiration losses with water stress, etc.) (Tivy, 1993), mechanical effects on trees, with break of branches and fall of entire plants (Tivy, 1993), destabilisation of snow cover with enhanced risk of avalanches (Kappenberger and Kerkmann, 1997), rapid snow melting with strong discharge increase of Alpine rivers and significant changes in water storage of Alpine glaciers (Greppi, 1999), strong moisture reduction in forestry litters giving risk of forest fires (Chandler *et al.*, 1983), whose propagation is enhanced by the extreme variability of velocity and direction of föhn winds and, finally, strong effects on the features of the Planetary Boundary Layer (e.g. the level and quality of air pollution) (Lorenzini, 1999).
An example of the role played by föhn in land degradation is shown by the north föhn events of March 1998, a month with a very high number of north föhn episodes in Lombardy (Italy). The consequence was an exceptional number of fires in the Alpine area; the debris flow phenomena observed at Ardenno (Valtellina) in June 1998 as a consequence of a common summer shower were the final product of this anomalous event.
Works presenting quantitative data about north föhn climatology in the Po Valley are unusual. Giuliacci (1985) presented the total number of monthly föhn episodes at Milano Linate station for 1970-81 period. Musso and Cassardo (2004) presented some climatic evaluations about föhn in Piedmont. This justifies the

Tab. 2 – Criteria adopted to identify föhn
Tab. 2 *– Criteri adottati per individuare il föhn*

A. punctual criteria (station's data)

1. *abrupt rise of air temperature with a simultaneous drop of relative humidity*
2. *winds blowing from the mountains (this condition is not always respected: in some cases and for short periods it can be observed a circulation from other directions and, at worst, southerly winds)*
3. *data from meteorological observers (visibility, sky clearness, cloud coverage and type)*

B. mesoscale criteria

1. *precipitation occurrence on the windward slope and higher temperature on the lee side (applied for the attribution of doubtful cases)*
2. *pressure gradient across the Alpine range*

C. synoptic criteria

A typical north föhn is produced by an Atlantic anticyclone expanding toward Central Europe which previously was influenced by a dynamic depression. In this case the main symptoms of föhn are the following:
1. *mid tropospheric flow (700 500 hPa) nearly perpendicular to the Alps range;*
2. *low troposphere (850 hPa) geopotential field or surface pressure field shows a typical "föhn nose", or ridging, over the Alpine range.*

importance of the quantitative study of the climatology of north föhn presented in this paper.

Methods

Föhn cases for the period 1991-2003 were analysed in the following selected stations (Table 1) of Western Lombardy (Italy) and Canton Ticino (Switzerland): Locarno-Monti (Alpine area), Castellanza (high plain), Milano (low plain) and Somaglia (low plain) (figure 1 and table 1). From 2000 to 2003 the data from Somaglia were substituted with data gauged at the near station of Spessa. Criteria adopted to recognise föhn are listed in table 2. Synoptic and mesoscale criteria were applied to the whole area while punctual criteria were different for the various stations according to the data availability; Table 3 summarises the criteria adopted for the four stations; criteria A.2 and A.3 cannot be applied to Somalia which is an automatic stations, without meteorological observers and wind measurements.
Seasonal analysis of the dataset was carried out considering the classical meteorological seasons (December 1st – February 28th for Winter, March 1st – May 31st for Spring, etc.). The analysis of frequency of different combinations of presence/absence of föhn in the four selected stations was carried out adopting the following rules to represent the combinations of föhn occurrences:
(i) the four stations are considered in a north - south sequence (Locarno-Monti, Castellanza, Milano and Somaglia);

Tab. 3 – Punctual and mesoscale criteria adopted to identify föhn.
Tab. 3 *– Criteri puntuali e a mesoscala adottati per identificare il föhn.*

Criteria	Locarno-Monti	Castel-lanza	Milano	Soma-glia
A.1	*adopted*	*adopted*	*adopted*	*adopted*
A.2	*adopted*	*adopted*	*adopted*	*not adopted*
A.3	*adopted*	*adopted*	*adopted*	*not adopted*
B.1 – B.2	*adopted*	*adopted*	*adopted*	*adopted*
C.1 – C.2	*adopted*	*adopted*	*adopted*	*adopted*

(ii) the presence/absence is represented according to a binary code (1=presence, 0=absence).
For example the combination LC0S means that, on a given day, föhn was present in Locarno-Monti, Castellanza and Somaglia and was absent in Milano. Fifteen combinations are possible (the 16th - 0000 - representing the total absence of föhn).
Distance from the watershed is strictly related to frequency and strength of föhn (Barry, 1992). The analysis of correlation between distance from Alpine watershed and mean number of föhn days was carried by means of the linear correlation function lm present in software library STAT of the R statistical software (http://cran.r-project.org) (Chambers, 1992; Wilkinson and Rogers, 1973)
Statistical stationarity (homogeneity of time series) is one of the most fundamental assumptions of most statistical test and procedures. The change-point problem addresses a lack of stationarity in a sequence of random values (Lanzante, 1996). The most common change-point problem involves a change (discontinuity) in the level (mean) and is the focus here.
Change point analysis on 1956-2003 time series of föhn days at Locarno-Monti was carried out by means of the software library Strucchange of the R statistical software (http://cran.r-project.org) (Baj and Perron, 2003; Zeileis *et al*., 2003).

Results

Tables 4 and 5 show the yearly, seasonal and monthly frequencies of north föhn in the reference area for the period 1991-2003. Mean and extreme values are reported.
Results of the analysing of the frequency of different combinations of presence/absence of föhn in the four selected stations are represented in table 6.
The linear correlation between yearly and seasonal föhn days and distance from Alpine watershed was next examined and the results are reported in figure2 and table7.
We also examined the very long time series of föhn days at Locarno-Monti: in table 8 are represented monthly, seasonal and yearly statistics of föhn days for the period 1956-2003. Results of the change point analysis in order

Tab. 4 - Mean, minimum and maximum number of föhn days in the four stations (1991-2003)
Tab. 4 *– Numero medio, minimo e massimo di giorni con föhn nelle 4 stazioni (1991-2003)*

		Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
Locarno-Monti	*mean*	3.1	4.3	5.1	4.5	2.8	2.1	2.5	1.3	2.5	2.5	3.5	3.5	37.8
	min	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	22
	max	10	7	10	10	11	5	7	3	9	7	7	7	51
Castellanza	*mean*	2.2	2.9	3.7	2.2	1.1	1.2	1.5	0.8	1.5	1.5	2.1	2.7	23.3
	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
	max	6	6	8	6	5	3	3	3	4	6	7	6	36
Milano	*mean*	2.4	2.9	3.8	1.9	1.3	1.2	1.8	1.0	1.8	1.2	1.3	2.3	23.0
	min	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
	max	9	6	8	6	4	4	5	2	6	4	3	6	36
Somaglia	*mean*	1.6	2.5	2.4	1.3	0.6	0.6	0.3	0.5	1.2	1.0	0.9	1.1	13.8
	min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
	max	6	6	7	6	3	3	1	2	5	3	6	3	26

Tab. 5 - Seasonal föhn days in the selected stations (mean values 1991-2003)
Tab. 5 *– Giorni di föhn per stagione nelle stazioni in esame (valori medi 1991-2003)*

	Winter	Spring	Summer	Autumn
Locarno-Monti	15.8	18.0	8.4	12.3
Castellanza	11.3	10.1	5.0	7.2
Milano	11.0	10.1	5.8	6.3
Somaglia	6.9	5.7	1.8	4.1
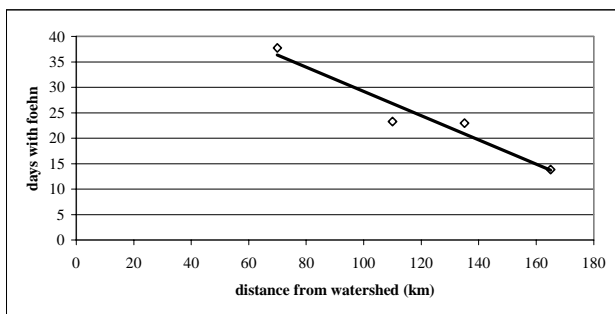
Fig. 2 - Days per year with föhn as function of the distance from the Alpine watershed. Interpolation line is defined by the equation y = -0.23856 x + 53.10180.
Fig. 2 *- Giorni annui con föhn in funzione della distanza dallo spartiacque alpino. La linea interpolante è definita dall'equazione y = -0.23856 x + 53.10180.*

to address the lack of stationarity in the time series are resumed in figure 3 and 4.

Discussion

The following deductions can be obtained from the analysis of seasonal and monthly occurrences of föhn (tables 4 and 5):

1. the seasons most affected by föhn in the selected area are Winter and Spring, with a dominance of Spring cases at Locarno-Monti and of Winter ones in other sites
2. March is the month most affected by föhn, followed by April in Locarno-Monti and by February in the other stations
3. the Alpine area is the most influenced by föhn, with the yearly mean number of days with föhn which decreases from the 37.8 days at Locarno-Monti to the 23 cases at Castellanza and Milano and to the 13 cases at Somaglia
4. The wind behaviour in Castellanza and Milano is quite similar, due to the reduced distance between the two stations and to the homogeneity of territorial features around them (stations are both within the great conurbation of Milano).
5. The data of monthly occurrences (mean and extreme values) of föhn reported in table 4 show the strong variability of this phenomenon, strictly related to the variability of synoptic features over Europe and of mesoscale features in the Alps and surrounding areas.

Tab. 6 - Table 6. Föhn episodes in the period 1991 – 2003. Analysis of the percent frequency of the 15 possible combinations 1000 .. 1001 (see in the text for the explanation of the symbols for Locarno-Monti - L, Castellanza -C, Milano - M and Somaglia - S).
Tab. 6 *– Episodi di föhn nel periodo 1991 – 2003. L'analisi della frequenza percentuale elle 15 possibili combinazioni 1000 ..1001 (si veda nel testo per il significato dei simboli adottati per Locarno-Monti - L, Castellanza -C, Milano - M e Somaglia - S).*

	L000	*LC00*	LCM0	*LC0S*	LCMS	L0M0	L0MS	0CMS	00MS	000S	0C0S	00M0	0CM0	0C00	L00S
Winter	27	8	10	2	24	8	0	7	0	2	2	4	4	2	1
Spring	35	6	9	5	17	7	3	1	0	0	1	6	4	5	1
Summer	27	11	18	2	12	9	0	2	0	2	2	15	0	2	0
Autumn	32	8	14	6	9	8	0	3	0	0	4	5	3	4	2
Total	121	33	51	15	62	32	3	13	0	4	9	30	11	13	4

Tab. 7 - Coefficients obtained from linear regression analysis (independent variable = Alpine watershed distance – km).
Tab. 7 – *Coefficienti ottenuti per regressione lineare (variabile indipendente = distanza dallo spartiacque alpino – km).*

Season	Coefficient of independent variable	intercept	r^2
Year	-0.23856**	53.10180**	0.9354
Winter	-0.08814**	21.82732***	0.9494
Spring	-0.12227**	25.64716**	0.9212
Summer	-0.06227*	12.72216**	0.8475
Autumn	-0.088412**	17.56985***	0.9500

Signif. codes: ***=99%; **=95%; *=90%

Tab. 8 – Monthly, seasonal and yearly statistics of föhn days at Locarno-Monti (1956-2003)
Tab. 8 – *statistica dei giorni mensile, stagionale ed annuale dei gironi di föhn a Locarno-Monti (1956-2003)*

	mean	**minimum**	**maximum**	**total**
January	4.9	0	15	234
February	4.7	1	11	226
March	6	0	16	287
April	5.9	0	16	284
May	3.4	0	11	162
June	3.2	0	8	152
July	2.9	0	8	141
August	2.8	0	8	132
September	2.3	0	9	108
October	2.6	0	8	126
November	4	0	11	192
December	4.4	0	12	211
Year	47	22	78	2255
Winter	14	4	27	671
Spring	15.3	7	32	733
Summer	8.9	0	17	425
Autumn	8.9	3	18	426

The variability in frequency of different combinations of presence/absence of föhn in the four selected stations (table 6) can be explained considering that air masses crossing the mountains increase their velocity and arrive in the southern slope of the Alps with typical undulations that can determine the exclusion of some stations from the föhn effect, with a process modulated by the thermo - hygrometric characteristics of the incoming currents and of pre-existing air mass.
In particular the shape of the Po Valley favours the accumulation and the stagnation of cold air masses of different origin (cold air flowing downhill under the influence of gravity, cold air advected from the East or produced 'in situ' by nocturnal radiation loss). The resulting cold layer in the low troposphere (cold lake) may act like an elastic surface on which föhn currents rebound without reaching the ground (Bonelli, 1988).
However this cold layer is often absent in the Milano area where it is partially or totally eroded by the urban heat island. This effect can enhance the drop to the ground of föhn currents, with a particularly evident effect in the L0M0 and 00M0 combinations. The combination LCMS (highly frequent) represents the strong föhn episodes which influence the whole area, whereas the highly frequent combination L000 groups the föhn cases which influence only the Alpine area and don't reach the plain. Combinations LC00 (highly frequent) and LCM0 (relatively frequent) are the result of a dynamic action that propagate towards plain but is depleted in the medium and low plain.
The presence of combinations L00S (infrequent), 0C0S (unusual), 0C00 (relatively frequent) and LC0S (quite frequent) and L0MS (infrequent) can be explained considering the above mentioned undulations modulated by thermo-dynamic characteristics of air masses.
The presence of föhn in the plain and the contemporaneous absence at Locarno-Monti (combinations 0CMS - relatively frequent - and 0CM0 - quite frequent) could be the product of different effects like (i) the direction of the dominant currents that protect Locarno-Monti from the föhn effect (ii) the position of the station, located on a steep southern slope and (iii) the presence of layers of cold air in the basin of the Lake Maggiore.
The analysis of relation between yearly föhn days and distance from Alpine watershed show that the number of föhn days in the analysed stations is strictly related to the distance from the Alpine watershed. Somaglia data show that föhn occurrences are relevant at distances of more than 150 km from the watershed and are about the 60% of Milano and Castellanza occurrences and 35% of the Locarno-Monti ones.
The knowledge of the relation of inverse proportionality between föhn days and distance from the Alps watershed could be important for research and operational activities that need a quantitative description of föhn presence.
The relation between yearly and seasonal days with föhn and the distance from the Alpine watershed can be effectively described by linear equations that show a highly significant correlation in the whole seasons (table 7). A lower correlation is observed in summer, maybe due to the circulation features of this season, characterised by pressure fields relatively smooth.
For the yearly case, the linear regression shows 53.1 days at the watershed and a decrease of about 2.4 days each 10 km of increase of the horizontal distance (figure 2).
The high value of the correlation coefficient show that this relation could be adopted to describe the mean number of föhn days in the study area on the base of the observations carried out at Locarno-Monti station. In our opinion a study extended to the whole Po valley could produce maps for this wind with iso-frequency lines almost paralleles to Alpine watershed. These maps could be important not only for agrometeorological aims but also for technical aims (e.g.: project of buildings).
Some interesting evaluations about time variability of North föhn phenomenon can be obtained analysing the time series of föhn days at Locarno-Monti for the period 1956-2003 (table 8, figures 3 and 4).
A preliminary analysis for the whole period shows a yearly average of 47 days with a prevalence of spring
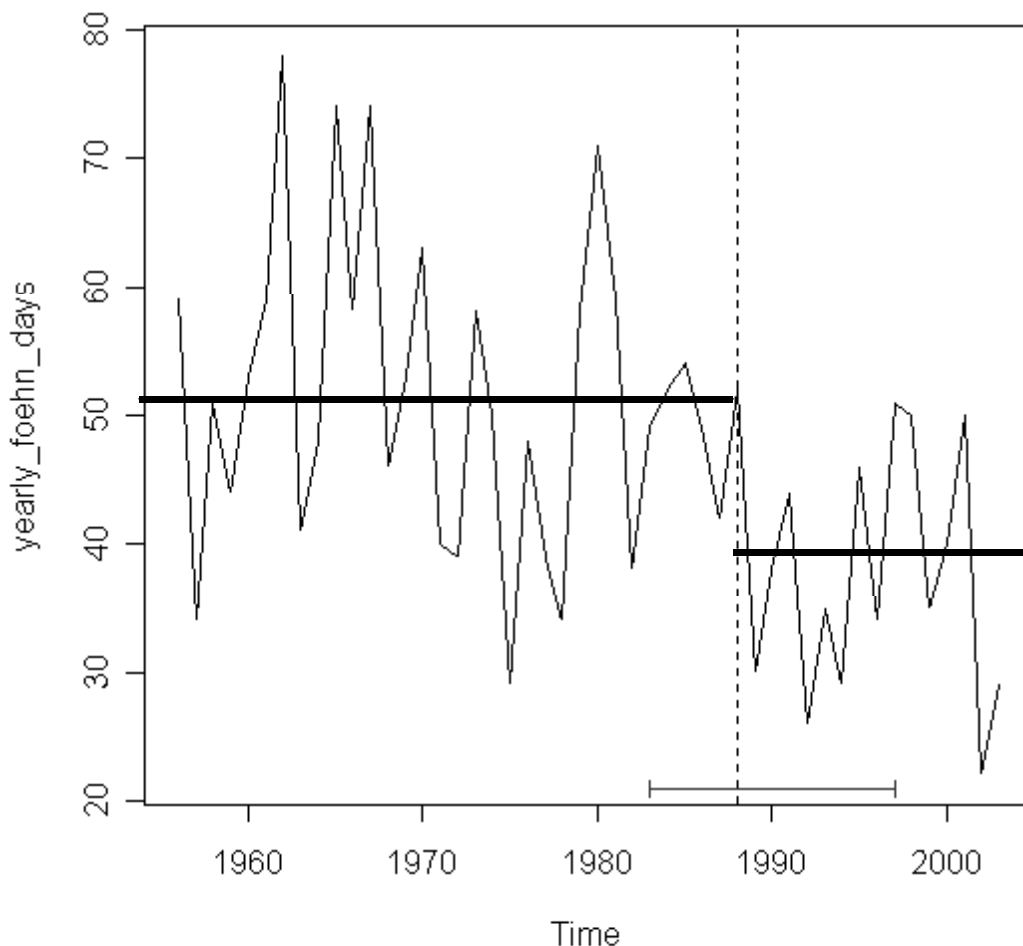
Fig. 3 – Yearly number of föhn days at Locarno-Monti for the period 1956-2003. Results of change point analysis are represented by vertical dotted line (change point defined by the specific statistical test) and by horizontal thin line (95% confidence interval). Horizontal thick lines represent the means of the two segments defined by the change point.

Fig. 3 – *Numero annuo di giorni di föhn a Locarno-Monti per il periodo 1956-2003. I risultati dell' analisi di change point analysis sono rappresentati dalla linea tratteggiata verticale (change point definito con uno specifico test statistico) e dalla linea orizzontale sottile (intervallo di confidenza del 95%). Le linee spesse orizzontali rappresentano le medie delle due fasi definite dal change point*

(15.3 days), followed by Winter (14.0) and Autumn (8.9).
Change point analysis for the yearly days of föhn (figure 3) show a change point in 1988 with a confidence interval of 95% between 1983 and 1997. 1988 was also recognised as change point for days of föhn in cold semester (figure 4), with a confidence interval of 95% between 1981 and 2003.
The change point in 1988 is coherent with the hypothesis that in the '80 years of XXth century the Euro- Mediterranean area suffered a climatic change characterised by the abrupt change in frequency and persistence of different circulation patterns over the area (Sneyers, Palmieri and Siani, 1993; Lockwood, 2002); the change was pointed out at macroscale by the behaviour of of North Atlantic Oscillation (NAO) index in Winter months (Werner *et al*., 2000) which shows a shift from a regime characterised by the alternation of eastern and western currents to a regime dominated by westerlies (Mariani, 2000).
If we adopt 1988 as the change point for North föhn, we can observe a mean number of 51 days with föhn per year for the period 1956-1987 and 38 days for the period 1988-2003. At the same time föhn days in cold period - semester October – March - that were 28 (55% of the whole yearly days) for the period 1956-1987 became 23 (61% of the whole year days) for the period 1988-2003. In other words the new climatic phase following the climate change of '80 years is characterised by a decrease of föhn days but this decrease is less pronounced in Winter period.

CONCLUSIONS

Results obtained show that föhn is an important environmental factor not only for the Alpine area but also for the whole Po valley. This means that agrometeorological activities carried out in this area need to take into account the presence of föhn and its influence on canopy layer variables (wind, temperature, relative humidity, wind, solar radiation and consequently evapotransipirational losses). Furthermore, changes in frequency and persistence of föhn can strongly influence mesoscale effects of climate variability in the Po Valley and this aspect must be considered in the downscaling of products of general climatic models which work at macro scale.
A possible limitation of this study might be found in the subjective classification of the föhn days which can be interpreted as a noise source. An alternative and more objective classification scheme could be based on discriminant analysis that could combine a number of criteria discriminating for föhn – non-föhn conditions. Nevertheless, the results obtained contribute to the understanding of the north föhn behaviour in the western part of the Po Valley.

ACKNOWLEDGEMENTS

We wish to thank
- the two anonymous technical reviewers for their useful suggestions
- Lorenzo Craveri (Ersaf) and Gian Piero Perucchini who supplied meteorological data for the stations of Spessa and Somaglia.
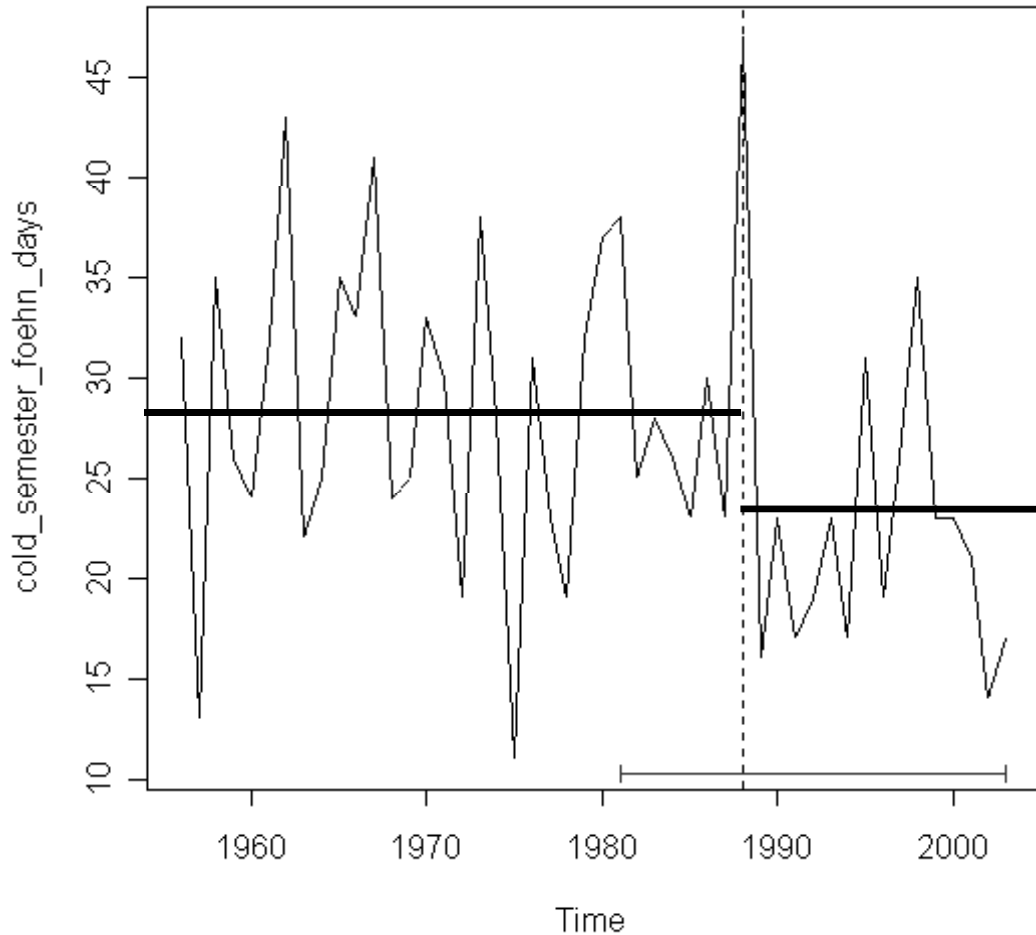
Fig. 4– Number of föhn days in winter semester at Locarno-Monti for the period 1956-2003. Results of change point analysis are represented by vertical dotted line (change point defined by the specific statistical test) and by hori-zontal thin line (95% confidence interval). Horizontal thick lines represent the means of the two segments defined by the change point.

Fig. 4 – *Numero di giorni con föhn nel semestre invernale a Locarno-Monti (periodo 1956-2003). I risultati dell' analisi di change point analysis sono rappresentati dalla linea tratteggiata verticale (change point definito con uno specifico test statistico) e dalla linea orizzontale sottile (intervallo di confidenza del 95%). Le linee spesse orizzontali rappresentano le medie delle due fasi definite dal change point.*

REFERENCES

Barry, G.R., 1992. Mountain weather and climate. Routledge, London, 315 pp.

Binder, P., Schar C., 1996. Mesoscale Alpine Programme (MAP) - Design Proposal. MAP Data Centre, http://www.map2.ethz.ch/map-doc/prop/, 77 pp.

Bonelli, P., 1988. I venti catabatici nella pianura padana. Le Scienze, 14-21.

Chambers, J. M. (1992) Linear models. Chapter 4 of Statistical Models in S. eds J. M. Chambers and T. J. Hastie, Wadsworth & Brooks/Cole.

Chandler, C., Cheney C., Thomas P., Trabaud L., Williams D, 1983. Fire in forestry, 2 Voll. John Whiley, New York, 435 pp.

Fea, G., 1988. Appunti di meteorologia fisica descrittiva e generale. Ersa Emilia Romagna, Bologna, 434 pp.

Giuliacci M., 1985. Climatologia storica e dinamica della Valpadana, CNR, Milano,301 pp.

Greppi, M.,1999. Idrologia, il ciclo dell'acqua e i suoi effetti. Hoepli, Milano, 209 pp.

Innis, G.S., 1978. Grassland simulation model. Springer – Verlag, Berlin, 299 pp.

Kappenberger, G., Kerkmann, J., 1997. Il tempo in montagna. Zanichelli, Bo, 255 pp.

Lockwood J.G., 2002. Abrupt and sudden climatic transitions and fluctuations; a review, Int. J. Climatol., Vol. 21, pp. 1153-1179

Lanzante J.R., 1996. Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: theory ad examples, including applications to historical adiosonde station data, Int. J. Climatol., Vol. 16, pp. 1197-1226.

Lorenzini, G., 1999. Le piante e l'inquinamento dell'aria. Edagricole, Bologna, 335 pp.

Mariani L., 2000. Fluttuazioni del clima e cambiamento climatico – alcune ipotesi per l'area padano – alpina, Rivista di Irrigazione e drenaggio, 47, n.2, 57-58.

Mc Intosh, D.H. & Thom A.S., 1972. Essentials of meteorology. Wikeham Publications ltd., London, 239 pp.

Monkhouse, F.J., 1970. A dictionary of geography. E.Arnold Publ., London. 378 pp.

Musso A., Cassardo C., 2004. Climatologia del föhn, Nimbus, 31-32, 39-45.

Richner H., 1974: Zusammenhänge zwischen raschen atmosphärischen Druckschwankungen, Wetterlagen und subjektivem Befinden. Dissertation No. 5253 Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zürich

Schrott D., Verant W., 2004. Il föhn sulle Alpi, Nimbus, 31-32, 13-39.

Sneyers R., Palmieri S., Siani A.M., 1993. Characterizing trends in climatological time series. An application to Brera observatory (Milan) rainfall series, Proceedings of international conference on applications of time series analysis to astronomy and meteorology, Università di Padova, 6-10 settembre 1993, pp. 321-328.

Tivy, J., 1993. Biogeography, a study of plants in the ecosphere (third edition). Longman, UK, 452 pp.

Werner, P. C., Gerstengarbe F.W., Fraedrich K, Oesterle K. Recent climate change in the North Atlantic/European sector Int. J. Climatol., Vol. 20, pp. 463-471.

Wilkinson, G. N. and Rogers, C. E. (1973) Symbolic descriptions of factorial models for analysis of variance. Applied Statistics, 22, pp. 392-399.

APPROCCIO QUANTITATIVO ALL'ANALISI DEGLI EFFETTI URBANI SUL CLIMA

QUANTITATIVE APPROACH TO THE ANALYSIS OF THE URBAN EFFECTS ON CLIMATE

Luigi Mariani[2]*, Gesualdo Sovrano Pangallo[2]

[1]: *Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Produzione Vegetale*
[2]: *Agronomo Lodi*
* *Corresponding author e-mail: meteomar@libero.it*

Ricevuto 17 novembre 2004, accettato 10 giugno 2005

Riassunto
L'articolo si propone di analizzare il mutamento del clima legato ai processi d'urbanizzazione (*urban warming*), fenomeno che è sotto gli occhi di tutti e che presenta un impatto di gran lunga superiore rispetto a quello del *global warming*. Vengono in particolare presentati alcuni strumenti modellistici empirici e meccanicistici utili per valutare l'impatto ambientale dell'urbanizzazione e per pianificare opportuni interventi di mitigazione. Strumenti di tale natura sono di rilevante importanza in quanto tutti gli esseri viventi del pianeta vivono all'interno dello strato limite atmosferico e pertanto sono assai sensibili alle alterazioni delle grandezze atmosferiche di tale strato. Dall'analisi condotta emergono le lacune conoscitive di tipo statistico relative al processo di urbanizzazione in Italia.

Parole chiave: Micrometeorologia, isola di calore urbana, riscaldamento globale, bilancio energetico

Abstract
The aim of this paper is an analysis of the climatic effects of urbanisation processes (urban warming), a phenomenon very evident and with an impact on urban environment significantly higher than global warming.
This paper presents some empirical and mechanistic approach able to quantify climatic effects of urbanisation on temperature showing that the approach based on mathematical models is useful to quantify the environmental effects of urbanisation and to define mitigation policies.
An approach of this kind is furthermore important due to the evidence that all living beings of our planet live into the boundary layer and are sensitive to the variability of the atmospheric variables into it.

Keywords: *Micrometeorology, Urban heat island, global warming, energy balance*

Introduction

Mentre il tema del riscaldamento globale (*global warming*) (IPCC, 2001) ha vasta eco nel mondo scientifico e sui mezzi d'informazione, assai limitato è oggi il dibattito su un'altra forma di cambiamento climatico, d'origine prettamente antropica, in atto da alcuni millenni e che solo negli ultimi secoli ha assunto entità tale da coinvolgere tutti noi in modo diretto: il cambiamento climatico dello strato limite. Lo strato limite (*Boundary Layer* – BL in lingua inglese) è lo strato atmosferico più vicino al suolo (la sua altezza varia da poche decine di metri a 1000 – 2000 m e oltre), in cui trascorre la propria esistenza la gran massa dei viventi, animali e vegetali. Per definizione il BL è lo strato a contatto con una superficie, le cui caratteristiche (temperatura, umidità, vento, radiazione, torbidità, ecc.) sono alterate in modo significativo dalla superficie stessa (Munn, 1966; Oke, 1972, Stull, 1997). Se le superfici marcano il confine inferiore dei BL, il suo confine superiore è rappresentato dalla libera atmosfera.

Il principale fattore che determina le peculiarità dello strato limite è il bilancio energetico di superficie, il quale esprime come gli input energetici e cioè la radiazione netta R_n e le emissioni energetiche umane (Ca) che hanno peso rilevante negli ecosistemi urbani, sono utilizzati per:

1. riscaldare l'aria a contatto con il suolo (innescando un flusso di calore sensibile H[1]);
2. evaporare, o traspirare se ci sono dei vegetali, l'acqua (innescando un flusso di calore latente LE);
3. riscaldare l'interno del suolo (innescando un flusso di calore nel suolo G).

Per una superficie in equilibrio energetico (energia in ingresso pari a quella in uscita), considerati positivi i flussi diretti verso la superficie e negativi quelli che se ne allon-

[1] I termini calore sensibile e calore latente sono molto antichi e vengono da un'epoca remota in cui si pensava che il calore fosse una sostanza. Il calore sensibile è tale in quanto può essere "sentito" e cioè percepito da noi e dai nostri strumenti; il calore latente è invece una forma "occulta" di calore, immagazzinata dall'acqua durante i processi di fusione ed evaporazione e liberata nei processi inversi (condensazione e solidificazione)..

tanano e trascurati i termini di accumulo, varrà la relazione:

$$Rn+G+H+LE+Ca = 0 \quad [1]$$

Con riferimento ai termini di tale equazione vediamo dunque di descrivere gli effetti urbani più caratteristici.
La radiazione netta (R_n) è frutto del bilancio tra la radiazione solare globale in arrivo Rg [W m^{-2}] al netto dell'albedo A [%], e l'emissione di radiazione a onda lunga della superficie della Terra RL [W m^{-2}]; i gas serra, insieme alle nubi e al pulviscolo atmosferico, agiscono sul termine RL, intercettandolo in parte e reirradiandolo verso il suolo. In tal modo limitano il raffreddamento della superficie terrestre per irraggiamento verso lo spazio. Pertanto varrà l'equazione

$$Rn=Rg*(1-A)-RL \quad [2]$$

con riferimento ai termini della (2) l'urbanizzazione agisce anzitutto sull'albedo, frazione della radiazione solare riflessa verso lo spazio. Infatti, nel caso di vegetazione spontanea o coltivata, l'albedo è dell'ordine del 20-30%, mentre nelle città il valore è mediamente più basso, fino a valori inferiori al 5% nel caso di superfici asfaltate. In altri termini la superficie urbana assorbe più energia solare rispetto alle aree rurali. Inoltre l'emissione nell'infrarosso delle superfici RL viene in parte intrappolata nei *canyon* urbani e reirradiata verso terra; lo stesso effetto è dato dalla cappa di pulviscolo che sovrasta le aree urbane e che riduce da un lato la radiazione solare entrante e dall'altro la radiazione netta uscente RL.
In complesso dunque le aree urbane rispetto a quelle rurali sono più ricche d'energia e tale squilibrio si acuisce ulteriormente in virtù delle fonti di calore umane (combustioni Ca).
Con riferimento al termine H e considerando i soli flussi verticali, potranno aversi tre casi:

- convergenza del flusso: flusso H in ingresso nel volume d'aria (per cessione da parte delle superfici sottostanti) superiore a quello in uscita; la conseguenza è il riscaldamento del BL;
- divergenza del flusso: flusso H in ingresso nel volume d'aria inferiore a quello in uscita; la conseguenza è il raffreddamento del BL;
- flusso non divergente: flusso H in ingresso pari a quello in uscita; temperatura del BL stazionaria.

In pratica in giornate soleggiate e con tempo stabile il BL urbano cede con facilità calore alla libera atmosfera per rimescolamento verticale e dunque si riscalda poco rispetto al BL rurale; viceversa di notte, con l'esaurirsi dell'effetto del soleggiamento, i movimenti verticali si attenuano sensibilmente per cui il calore emesso dalle superfici ristagna nel BL (convergenza). E' infatti nella fase notturna che si osserva la maggior differenza di temperatura fra BL urbano e BL rurale.
Pertanto il termine H gioca un ruolo chiave nel determinare la temperatura della massa d'aria che sovrasta la città. Infatti a parità di comportamento del BL urbano e rurale in termini di cessione di calore alla libera atmosfera che li sovrasta, la temperatura dei due sistemi dipenderà dall'entità del calore sensibile ceduto dalle superfici al BL. Da questo punto di vista si può rilevare che in aree rurali, in una giornata estiva, è comune osservare che il 60-80% di Rn è utilizzata dalle piante per evapotraspirare acqua (termine LE) e solo il 20-40% per riscaldare l'aria (termine H)[2]; nelle aree urbane invece la scarsità di vegetazione e d'acqua evaporabile fanno si che il flusso di calore latente sia di molto ridotto rispetto a quelle rurali, per cui il flusso d'energia che compensa Rn e Ca è in gran parte in forma di calore sensibile H[3].
È immediato osservare che al diminuire del rapporto H/LE diminuisce il potere di una superficie di riscaldare l'aria sovrastante, per cui le diverse superfici possono essere ordinate dalla meno attiva alla più attiva, così come segue:
Acqua → Foresta → Prato → Cereali e altre coltivazioni → sabbie → roccia o aree urbanizzate
La questione è in realtà più complessa, perché differenze di colore, rugosità, umidità e capacità di intrappolare la radiazione a onda lunga possono assumere un'importanza pari o superiore rispetto alla natura delle superfici. In ogni caso è importante evidenziare che l'effetto di una foresta sul bilancio energetico si esplica non solo a livello di ciclo del carbonio (sottrazione di CO_2 all'atmosfera e contenimento dell'effetto serra) ma anche ed in modo assai più immediato traspirando grandi quantità d'acqua.
Da quanto affermato consegue che le attività umane che modificano la superficie del pianeta (deforestazione, messa a coltura o abbandono dell'attività agricola, costruzione di dighe, tombinamento dei corsi d'acqua, bonifica e prosciugamento, ecc.) sono in grado di provocare sensibili variazioni della temperatura, agendo sul termine H del bilancio energetico. Varrà dunque la regola generale secondo cui, se si privilegiano aree umide, foreste e prati o se si estendono le superfici irrigate, lo strato limite presenterà un microclima più umido e fresco, mentre se si elimina la copertura vegetale si andrà verso un microclima più caldo e arido.
Ci siamo fin qui limitati a considerare i flussi verticali di energia nel BL. In merito ai flussi orizzontali basti osservare che nell'ambito rurale le brezze possono esplicare appieno il loro effetto omogeneizzando il calore sensibile fra zone più calde (terreni arati, colture in stress idrico, ecc.) e zone meno calde (superfici idriche, colture irrigue, vegetazione naturale, ecc.); nell'ambito urbano invece le barriere costituite dagli edifici limitano notevolmente le brezze e ne vanificano in buona parte l'effetto refrigerante.
Vediamo ora di sviluppare alcune considerazioni quantitative sull'isola di calore urbano: l'urbanizzazione dei suoli costituisce - insieme con il rilascio nell'atmosfera di gas serra - il tratto distintivo della moderna civiltà industriale ed implica l'impermeabilizzazione artificiale dello strato superficiale tramite un rivestimento costituito dai più svariati materiali edilizi (cemento, mattoni, asfalto, legno, tegole, pietra, marmi, vetro, plastica, ferro e metalli vari, ecc.).

[2]il rapporto H/LE delle aree agricole e forestali dipende dalla disponibilità idrica, a sua volta legata alle precipitazioni ed all'irrigazone.

[3] che il rapporto H/LE tipico delle aree urbane trova riscontro a livello planetario nelle aree predesertiche, il che esprime in modo assai significativo l'impatto ecologico delle metropoli.

Tab. 1 - Isola di calore urbano massima in città europee ed americane, secondo il modello di Landsberg (Oke, 1972).
Tab. 1 *– maximum Urban heat island in European and American cities, following the model of Landsberg (Oke, 1972).*

Numero abitanti	UHI (°C)	
	Città europee	Città americane
1.000	2.0	3.4
10.000	4.0	6.1
100.000	6.0	8.9
500.000	7.4	10.8
1.000.000	8.0	11.6
2.000.000	8.6	12.4
3.000.000	9.0	12.9
4.000.000	9.2	13.2
5.000.000	9.4	13.5
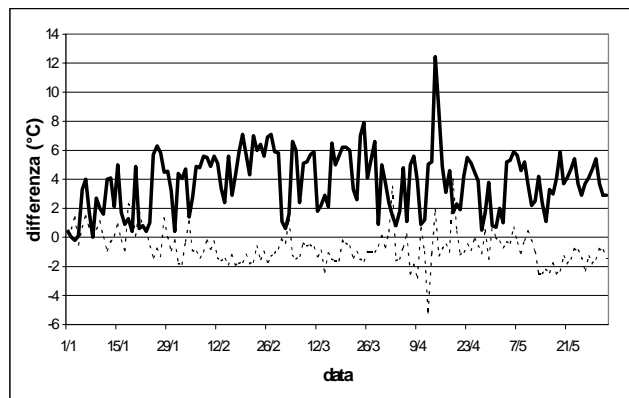
Fig. 1 –Isola di calore di Milano dal 1 gennaio al 1 giugno 2003 espressa come differenza fra le temperature della stazione sinottica di Milano Linate e quelle di una stazione urbana di via Modigliani, posta sul tetto di un edifico a 15 m di altezza sul piano stradale. Le linee indicano rispettivamente le temperature massime (- - - -) e le minime(——). Differenze positive indicano che la stazione di via Modigliani è più calda rispetto a quella di Linate. Il valore massimo dell'UHI viene raggiunto il 14 aprile (12.5°C).

Fig. 1 *– Urban Heat Island of Milano for 1 January – 1 June 2003, expressed as the difference between data from synoptic station of Milano Linate and from Urban station of Milano – via Modigliani, located on a roof of a compound (of 15 m of height above the road floor. The lines show respectively maximum **(- - - -)** and minimum **(——)** temperatures. A positive difference means that the station of via Modigliani is warmer than Linate station. The maximum UHI is reached in date 14 april*

In particolare la differenza di temperatura tra urbano e rurale, correntemente definita isola di calore (in inglese *Urban Heat Island* o UHI) è l'espressione più caratteristica della diversità a livello di bilancio energetico e idrico. Nella figura 1 è riportato a titolo indicativo l'andamento dell'UHI per due stazioni dell'area milanese nel periodo 1 gennaio – 31 maggio 2003.
A livello globale Landsberg (1981) ha trovato che il valore medio di UHI è funzione della dimensione della città, secondo la relazione empirica:

$$\Delta t_{(u\text{-}r)}\ °C = 0.1\ d \qquad [3]$$

in cui d = diametro della città in km, u = ambiente urbano, r = ambiente rurale. Lo stesso Landsberg (Oke, 1972) ha proposto un modello empirico per ricavare l'isola di calore massima, vale a dire la massima differenza di temperatura fra area urbana e area rurale, in funzione del numero di abitanti (tabella 1). Si tratta di valori di prima approssimazione e che tuttavia mostrano che anche un piccolo agglomerato urbano può dar luogo a temperature dell'aria significativamente diverse da quelle della campagna circostante. In proposito si vedano i dati relativi ad alcune aree urbane padane riportati da Sovrano (1998) e da Mariani e Sovrano (2001).
Scopo che si prefigge il lavoro è quello di indagare in termini quantitativi l'effetto urbano attraverso un approccio a micro ed a mesoscala.

Materiali e metodi

Nei paragrafi precedenti abbiano succintamente descritto i fenomeni fisici alla base dell'isola di calore urbano. Tali fenomeni sono descrivibili in termini quantitativi utilizzando modelli micrometeorologici fondati sul bilancio energetico di superficie.
In particolare al fine di dimostrare che le differenze (in termini di albedo, di rapporto fra calore latente e calore sensibile, ecc.) esistenti fra urbano e rurale sono descrivibili matematicamente, gli autori hanno sviluppato un modello di simulazione semplificato che ha come input il dato di radiazione solare globale (Rg) e umidità relativa (Rh). Il modello opera con step orario e si basa sull'ipotesi che la superficie S1 rispetto alla quale viene redatto il bilancio energetico presenti un flusso di calore sensibile verso una superficie limite S2 posta a distanza tale da non risentire dell'escursione termica diurna. Nell'esempio qui riportato, riferito all'inizio di aprile, S2 è rappresentata dalla superficie isobarica di 950 hPa che in quel periodo si suppone non essere influenzata dal suolo e la cui temperatura media giornaliera (11°C) è stata stimata a partire dalla temperatura delle ore 12 a 850 hPa riportata dalle carte sinottiche, applicando un gradiente di 0.6°C/100 m.

Nel modello la radiazione netta a onda lunga (termine dell'equazione 2) viene stimata con la classica equazione di Brunt (Sutton, 1953):

$$RL=\sigma*(Ta+273.02)^4 *(1-a-b*(ea)^{0.5})*(1-ac*C)) * Svc \quad [4]$$

Ove σ è la costante di Stefan Bolzmann, Ta è la temperatura dell'aria, ea è la tensione di vapore attuale, C è la copertura nuvolosa in decimi ed ac è un coefficiente legato al tipo di nube (vale 0.2 per i cirri, 0.65 per i cumuli e 0.85 per gli strati); a e b sono coefficienti empirici per i quali si sono adottati i valori (a=0.44; b=0.080) riportati da Sutton (1953) ed infine Svc è il fattore di visione del cielo (tabella 2) che rende ragione della percentuale di cielo visibile dal punto cui si riferisce l'elaborazione.
Il flusso di calore latente LE viene considerato nullo per Rn<=0 mentre per Rn > 0 si applica l'equazione seguente:

$$LE = - Cf0*Rn \quad [5]$$

ove Cf0 (Tabella 2) esprime la percentuale di Rn trasformata in calore latente.
Il flusso di calore nel suolo G viene anch'esso espresso in funzione di Rn attraverso la seguente equazione:

$$G= cf1-cf2*Rn \quad [6]$$

Ove cf1 e cf2 (tabella 2) sono coefficienti empirici.
Attingendo alla tabella 2 per i valori di Ca (flusso di calore di origine antropica) disponiamo così di tutti gli elementi necessari per ricavare il flusso di calore sensibile a partire dall'equazione (1) che diviene:

$$H=-(Rn+G+LE+Ca) \quad [7]$$

Infine la temperatura di superficie viene ricavata con l'equazione:

$$Ts=T950 + \Delta z*(- H_{h-hdelay} /(ro1*cp*KH)) \quad [8]$$

ove T950 è la temperatura media giornaliera a 950 hPa, Δz (pari a 550 m) è la differenza di quota fra il suolo e la superficie di 950 hPa, KH [$m^2 s^{-1}$] è il coefficiente di scambio turbolento per il calore sensibile per il quale si adotta il valore medio per i primi 1000 m di atmosfera (5 $m^2 s^{-1}$) indicato in Dutton (1986).
Un'importante semplificazione introdotta nell'equazione (8) consiste nell'utilizzare il flusso di calore sensibile al tempo h-hdelay, e cioè il flusso ricavato con la (7) e riferito a hdelay ore prima, per imporre al sistema un effetto volano che descriva il ritardo nel raggiungimento del massimo termico diurno in aria rispetto al massimo di radiazione solare.
Per il nostro esperimento di simulazione dell'andamento termico in 24 ore per una stazione rurale (stazione di Montanaso della rete dell'Ufficio centrale di Ecologia Agraria) e per una stazione urbana (stazione di Milano – via Modigliani) si è scelto il primo aprile 2004, giornata caratterizzata da condizioni anticicloniche con cielo sereno e vento debole.

Tab. 2 – parametrizzazioni adottate in il modello di stima delle temperature orarie.
Tab. 2 *– parameters adopted in the model for the estimation of hourly temperatures*

Parametro	Unità	Milano	Montanaso
Fattore di visione del cielo	%	0.55	1
Albedo	%	0.1	0.25
Flusso di calore di origine Antropica (Ca)	$W m^{-2}$	10	0
Cf0	%	0.35	0.65
Cf1	-	0	20
Cf2	-	0.41	0.10
Hdelay	ore	4	2
Vento costante considerato	$M s^{-1}$	2	2

Tab. 3 – indici di performance del modello per la stima delle temperature orarie.
Tab. 3 *– indexes of performance of the model for the estimation of hourly temperatures.*

stazione	Media Osservazioni	Media Stime	MAE	RMSE	EF	CRM	CD
Milano via Modigliani	14.03	13.08	1.13	11.69	0.74	0.07	1.12
Montanaso	11.01	10.41	1.70	21.95	0.77	0.05	0.98

MAE=errore medio; RMSE=errore quadratico medio; EF=efficienza del modello; CRM=coeffciiente di massa residua; CD=coefficiente di determinazione; R2=coefficiente di correlazione
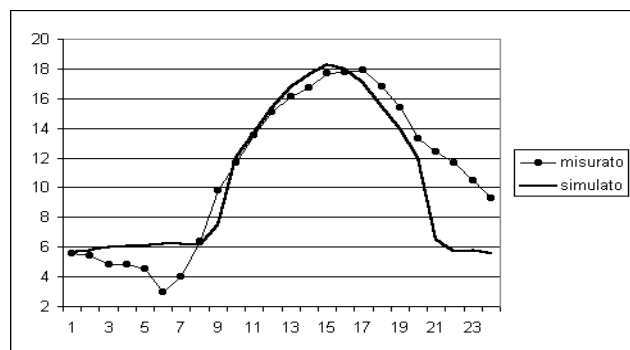
Fig. 2 – temperature orarie misurate e stimate per la stazione di Montanaso
Fig. 2 *– Hourly temperatures measured and simulated for the station of Montanaso*

Risultati e discussione

I risultati ottenuti (figure 2, 3 e 4) appaiono discretamente accurati, pur in presenza di qualche imprecisione nelle ore serali. Le prestazioni del modello sono quantificate attraverso gli indici riportati in tabella 3.
Abbiamo fin qui discusso dell'effetto urbano a livello microclimatico mostrando come tale effetto sia descrivibile in termini matematici. Se invece parliamo di quantificazione dell'effetto urbano sul macroclima (clima planetario o di grandi aree geografiche) , effetto che a prima vista possiamo ritenere di entità limitata, ci accorgiamo che la stima quantitativa per mezzo di modelli meccanicistici appare proibitiva in virtù del fatto che l'energia dallo strato limite si disperde in un volume ben più grande, la libera atmosfera, la quale fino al limite della stratosfera è alta in media 10-12 km alle nostre latitudini.
Un possibile approccio a tale problema potrebbe basarsi sull'adozione di un modello concettuale di cambiamento climatico di tipo circolatorio (Lamb, 1966 e 1977) secondo il quale ogni cambiamento nel bilancio energetico del pianeta si traduce in modifiche della posizione delle grandi strutture circolatorie (anticiclone delle Azzorre, grandi correnti occidentali, ecc.); tali modifiche di posizione causano a loro volta il cambiamento della frequenza e persistenza dei tipi di circolazione che influenzano un dato territorio (nel caso dell'Italia si pensi ad esempio alla frequenza e persistenza delle situazioni di foehn, di bora, di perturbazioni atlantiche, di situazioni anticicloniche, ecc.); tale cambiamento a sua volta perturba i valori delle grandezze meteorologiche al suolo (temperatura, precipitazione, vento, radiazione, ecc.) ed influenza così il bilancio energetico di superficie; quest'ultimo va a sua volta ad

incidere sulla posizione delle grandi strutture circolatorie e così il ciclo si chiude.
Occorre peraltro considerare che il segnale legato alle maggiori temperature urbane è almeno in parte[4] incorporato nei dati che esprimono l'andamento climatico globale, poiché le serie storiche di molte stazioni risentono dell'effetto urbano. Comunque il nocciolo del problema è che chi vive in aree urbane (cioè oltre la metà della popolazione mondiale, e domani quasi tutta) deve fare i conti più con l'effetto urbano che con il cambiamento climatico globale. E se il global warming ha comportato un aumento delle temperature medie di 0.5-0.6 °C in un secolo, nello stesso periodo l'effetto delle grandi realtà urbane è stato in molti casi superiore. Ad esempio, la città di Milano in 158 anni ha manifestato un aumento complessivo della temperatura dell'aria al suolo di 2.54°C per la massime e di 0.88°C per le minime (Chlistovsky, Buffoni e Maugeri, 1997).

Conclusioni

E' a questo punto lecito domandarci perché il riscaldamento urbano sia così spesso sottovalutato o ignorato. Da una parte l'effetto serra affascina e intimorisce l'immaginario collettivo, dall'altra gli effetti negativi della città sono volutamente ignorati perché mettono in discussione la crescita urbana, che è l'essenza della moderna civiltà di massa ed il motore dell'industria del mattone la quale, tanto nei momenti di ristagno e crisi economica (caso dell'Occidente) tanto nei momenti di forte crescita del Pil (caso della Cina, India e altri Paesi emergenti), alimenta gli appetiti dei grandi capitali finanziari e del risparmio privato.
Per inciso, un effetto che aggrava l'impatto climatico dei processi di urbanizzazione e che li accomuna una volta di più alla desertificazione, è la loro irreversibilità, il che ci porta al paradosso per cui è più semplice ridurre le emissioni di gas serra che riportare allo stato naturale superfici che siano state urbanizzate.
A questo punto, anche se ogni ricetta preconfezionata mostra limiti notevolissimi, perché impatta su un sistema socio-economico a flessibilità assai ridotta, riteniamo importante indicare alcuni percorsi virtuosi utili ad arginare l'enorme e multiforme problema (climatico e non solo) aperto dall'urbanizzazione.
L'obiettivo fondamentale da perseguire è quello dell'effettiva tutela dei suoli agricoli e naturali, da realizzare attraverso rigorose politiche territoriali e con l'inasprimento delle regole urbanistiche, oggi in Italia assai blande e permissive. Cosa non difficile, se si pensa che il nostro Paese sta attraversando una fase di stagnazione economica e industriale e che la popolazione fa segnare aumenti modesti o addirittura flessioni! Inoltre, è urgente avviare un sistematico monitoraggio dello sviluppo urbano ed in tal senso le immagini da satellite o da aereo possono fornire dati utilissimi, superando la frammentarietà, limitatezza e difficoltà d'aggiornamento delle statistiche ufficiali oggi disponibili.
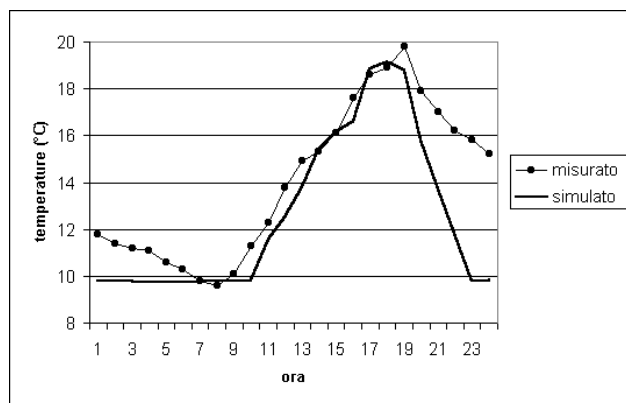
Fig. 3 – temperature orarie misurate e simulate per la stazione di Milano – via Modigliani
Fig. 3 *– Hourly temperatures measured and simulated for the station of Milano – via Modigliani*
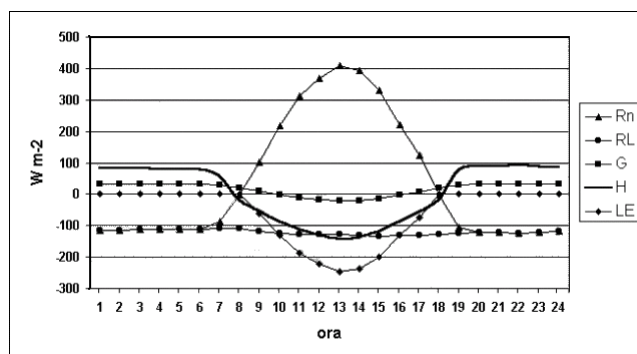
Fig. 4 – andamento dei termini del bilancio energetico di superficie modellizzati per la stazione di Montanaso (1 aprile 2004).
Fig. 4 *- daily evolution of different variables of surface energy balance simulated for the station of Montanaso (1 april 2004).*
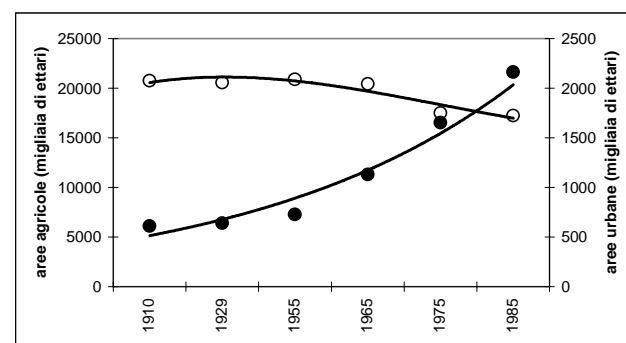
Fig. 5 – evoluzione della superficie agricola e di quella urbana in Italia secondo le fonti ufficiali – elaborazioni su dati INEA (Istituto Nazionale di Economia Agraria 1990).
Fig. 5 *– evolution of agricultural and urban areas according to official statistics – INEA, National Institute of Agricultural Economy, 1990.*

Preoccupa certo anche lo stato delle reti di monitoraggio meteorologico nel nostro Paese, la cui cronica disorganizzazione impedisce spesso di descrivere quantitativamente i processi di cui abbiamo parlato in questo articolo.
Anche i modelli semplificati citati in questo lavoro meritano di essere superati da modelli più performanti che

[4] la depurazione delle serie storiche dagli effetti urbani si basa su opportune procedure statistiche che tuttavia non sono garanzia di un risultato totalmente efficace.

possano supportare efficacemente quanti sono chiamati a valutare gli effetti urbani in termini quantitativi. A tale proposito immaginiamo che il nostro Paese, proprio per la sovrabbondanza di aree urbane, possa per lo meno rivelarsi una palestra unica per quanti studiano gli effetti urbani sul clima.
In conclusione si pone un problema culturale che va ben aldilà delle normative più o meno vincolistiche; il problema dell'urbanesimo si può infatti affrontare con speranza di successo solo facendo radicare nei cittadini una cultura ambientale fatta di rispetto per il territorio e di parsimonia nell'uso della risorsa suolo, bene limitato e da conservare per le future generazioni.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il dott. Teodoro Georgiadis del CNR per gli utili consigli ricevuti nella fase di stesura del presente lavoro.

Bibliografia

Chlistovsky F., Buffoni L., Maugeri M., 1997. La temperatura a Milano – Brera, Edizioni CUSL, 200 pp;
Dutton J.A., 1986. Dynamics of atmospheric motion, Dover Publications Inc. New York, 617 pp;
Istituto Nazionale di Statistica. 2003. 5° Censimento generale dell'agricoltura, Dati per regione sulla situazione dell'Italia: www.istat.it;
Istituto Nazionale d'Economia Agraria. 1990. Annuario dell'agricoltura italiana, INEA, Il Mulino, Bologna, XLIV: 439-451;
IPCC, 2001. Third Assessment Report on Climate Change, Cambridge University Press: www.ipcc.ch/;
Lamb H. H. 1966. The changing climate, Methuen, London: 236 pp;
Lamb H. H. 1977. Climate, present, past and future, Methuen, London: 545 pp.
Landsberg H. E.. 1981. City Climate. In Landsberg H. E. (Ed). General Climatology, World Survey of Climatology. Elsevier, Amsterdam, Vol. 3: 299-334;
Mariani L., Sovrano Pangallo G.. 2001. Effetti urbani di piccoli centri della painura padana sull temperatura dell'aria, Acqua & Aria, 6: 97-104;
Munn R. E. 1966. Descriptive micrometeorology, Academic Press: 198 pp;
Oke, T.R.1972. Boundary layer climates, Methuen, London: 372 pp;
Sovrano Pangallo G.. 1998. Effetti urbani su temperatura dell'aria e precipitazioni nell'area padana, Acqua & Aria, 9: 95-104;
Stull R. B. 1997. An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 670 pp;
Sutton O.G., 1953, Micrometeorology, McGraw Hill, 345 pp;

Appendice :
Urbanizzazione in Italia: alcuni dati statistici

Oggi la città cresce a ritmi vertiginosi, sia all'est sia all'ovest, sia nelle forme della megalopoli, sia in quelle della città diffusa con un effetto sul clima che mette a dura prova lo stato igienico e sanitario della popolazione.
A tale riguardo non sappiamo se i casi di aumento della mortalità a carico degli anziani registrati la scorsa estate in alcune grandi città europee siano da attribuire in modo diretto al riscaldamento urbano ed è pertanto auspicabile una risposta netta da parte dell'autorità sanitaria; tuttavia tali casi costituiscono un campanello d'allarme e gettano una luce sinistra sulle attuali forme di urbanizzazione selvagge e incontrollate.
Quanto al nostro Paese, le statistiche ufficiali mostrano per le aree urbane livelli di crescita molto vicini a quelli esponenziali, sulla base di specifiche indagini congiunte dell'Inea e dell'Istat (Figura 5). Purtroppo non sono note agli autori stime più recenti e statistiche correnti sull'uso del territorio, riferite all'intero territorio nazionale. Le più recenti acquisizioni sono principalmente basate sul progetto Corine varato negli anni Ottanta dal Consiglio della C.E.E. e sulle connesse metodologie innovative (immagini satellitari, ecc.). In particolare alcune esperienze effettuate dalla Regione Emilia-Romagna nell'ambito dell'Osservatorio del paesaggio e documentate su Internet, mostrano che in questi ultimi decenni l'occupazione urbana del territorio è aumentata enormemente nelle aree di pianura e meno in quelle montane.
Pare proprio che il destino sia quello di andare verso la progressiva sparizione dei suoli agricoli, fatto che è già una realtà in territori come la costiera ligure, la Brianza e la cintura milanese. Del resto i dati provvisori del 5° Censimento dell'agricoltura (ISTAT, 2003) evidenziano che intere regioni del sud e del nord sono uscite dal novero delle regioni agricole, con più del 20% di superficie agraria e forestale perduta nell'ultimo decennio.

ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA VARIABILITÀ METEO-CLIMATICA SULLA QUALITÀ DEL BRUNELLO DI MONTALCINO

ANALYSIS OF METEO-CLIMATIC VARIABILITY EFFECTS ON QUALITY OF BRUNELLO DI MONTALCINO WINE

Simone Orlandini[1]*, Daniele Grifoni[2], Marco Mancini[1], Giacomo Barcaioli[2], Alfonso Crisci[2]

[1]: Dipartimento di Scienze Agronomiche e Gestione del Territorio Agroforestale - Università di Firenze. Piazzale delle Cascine 18, 50144 Firenze. Italia.
[2]: Istituto di Biometeorologia – Consiglio Nazionale delle Ricerche. Via Caproni 8, 50145 Firenze. Italia.
* *Corresponding author, Tel: +39 0553288257, Fax: +39 055332472, E-mail: simone.orlandini@unifi.it*

Ricevuto 14 luglio 2004, accettato 14 marzo 2005

Riassunto

L'attività viticola è fortemente influenzata dalle condizioni meteorologiche che agiscono sui comportamenti della coltura determinando, in ultima analisi, quantità e qualità della produzione. La possibilità di studiare questi aspetti sulla base della variabilità meteo-climatica che si è accentuata negli ultimi anni e nella prospettiva del cambiamento climatico previsto per i prossimi decenni ha quindi un'importanza rilevante per fornire agli operatori strumenti di analisi e previsione utili per la gestione e pianificazione della loro attività. A partire da queste considerazioni, la presente ricerca è stata condotta con lo scopo di investigare la relazione esistente fra le condizioni meteo-climatiche e le caratteristiche qualitative del vino Brunello di Montalcino (Siena). Per quanto riguarda la qualità della produzione è stato utilizzato un indicatore sintetico annuale basato sull'analisi sensoriale del vino. Le condizioni meteorologiche della stagione di crescita sono state invece analizzate utilizzando i dati di stazioni a terra, quelli provenienti dalle *Reanalysis* (NCEP/NCAR Reanalysis Project), i valori dell'Indice NAO (North Atlantic Oscillation) e alcuni scenari futuri relativi ai cambiamenti climatici. I risultati mostrano significative correlazioni fra qualità e regime termo-pluviometrico della zona di produzione del Brunello e possono rappresentare il presupposto per la creazione di un sistema di monitoraggio e previsione della produzione viticola di qualità. Relativamente al possibile impatto dei futuri cambiamenti climatici, i risultati evidenziano come eccessi termici potranno incidere sulla qualità della produzione enologica.

Parole chiave: Vitis *vinifera L.*, analisi sensoriale, agrometeorologia, cambiamenti climatici, indici bioclimatici, Indice NAO

Abstract

Viticulture is strongly related to meteorological conditions. They can modify grapevine (Vitis vinifera L.) responses determining the quality of production. The possibility of studying these aspects on the basis of meteo-climatic variability and change has a high relevance, also in order to provide the growers with operational and forecasting tools to improve the management and planning of viticultural activity. On the basis of these considerations the present research has been performed with the aim of analysing the relationship between meteo-climatic conditions and the quality of Brunello di Montalcino wine (Siena – central of Italy). To describe the quality of wine a yearly index based on sensorial analysis has been used. Weather conditions during growing season have been described utilising the data collected from ground agrometeorological stations, from the reanalysis (NCEP/NCAR Reanalysis Project), from the NAO Index (North Atlantic Oscillation) and from the future scenarios of climatic changes. The results have pointed out significant correlations between weather conditions and quality of wine and can represent the basis for the realisation of a monitoring and forecasting system for high quality viticulture. The analysis of the climatic change impact has pointed out that the excess of temperature can play a significant role in the future quality of Brunello di Montalcino wine.

Keywords: *Vitis vinifera L., sensorial analysis, agrometeorology, climate change, bioclimatological indices, NAO Index*

Introduction

Le variabili meteorologiche hanno una notevole influenza sulle risposte vegeto-produttive della vite (*Vitis vinifera L.*) e sulla qualità del prodotto finale, sia in termini di uva che del risultato della sua trasformazione in vino. Da un anno all'altro l'efficacia delle concimazioni e delle lavorazioni, le tecniche di potatura e difesa, ed in generale tutta la gestione del vigneto risultano fortemente condizionate dall'andamento meteorologico, determinando grandi variazioni quantitative e qualitative del prodotto (Manaresi, 1946; Costacurta e Roselli, 1980; Fregoni, 1998). È quindi estremamente importante individuare strumenti di semplice applicazione che esprimano le re-

lazioni fra condizioni meteorologiche e produzione enologica, in modo da fornire agli operatori indicazioni circa l'andamento della stagione produttiva e gli interventi tecnici da mettere in atto per massimizzare il risultato della coltivazione (Maracchi, 2003). Questo risulta estremamente importante soprattutto nel periodo attuale caratterizzato da una estrema variabilità climatica, che aumenta le difficoltà gestionali, rendendo ogni stagione diversa dall'altra e, in generale, le condizioni ambientali differenti da quelle tipiche degli ambienti produttivi che gli operatori erano abituati a gestire sulla base della propria esperienza e della conoscenza del luogo.

I cambiamenti climatici in atto hanno indubbiamente accentuato l'interesse verso questi studi. Le temperature hanno infatti mostrato un *trend* crescente che nell'ultimo secolo ha portato ad un incremento medio di 0.8 °C delle temperature superficiali (Beniston *et al.*, 1998) con l'ultima decade del secolo (1990-1999) che è risultata la più calda mai registrata. Per quanto riguarda le precipitazioni, non si hanno ancora segnali univoci, ma è stato osservato un leggero aumento della frequenza degli eventi estremi. La disponibilità di scenari climatici previsti per i prossimi anni consente di analizzare i possibili impatti sulla viticoltura, individuando gli interventi di breve e lungo periodo necessari per mitigare le conseguenze negative e valorizzare quelle positive (Bindi *et al.*, 2002).

Tab. 1 - indice di valutazione qualitativa delle annate del vino Brunello di Montalcino.
Tab. 1 - *index of quality evaluation for Brunello di Montalcino wine.*

Qualità: stellette	Qualità: giudizio
✱	insufficiente
✱✱	discreta
✱✱✱	pregevole
✱✱✱✱	ottima
✱✱✱✱✱	eccezionale

Tab. 2 - valutazione qualitativa delle annate del vino Brunello di Montalcino.
Tab. 2 - *quality evaluation of Brunello di Montalcino wine during the study period*.

anno	qualità	anno	qualità	anno	qualità
1945	✱✱✱✱✱	1964	✱✱✱✱✱	1983	✱✱✱✱
1946	✱✱✱✱	1965	✱✱✱✱	1984	✱
1947	✱✱✱	1966	✱✱✱✱	1985	✱✱✱✱✱
1948	✱✱	1967	✱✱✱✱	1986	✱✱✱
1949	✱✱✱	1968	✱✱✱	1987	✱✱✱
1950	✱✱✱✱	1969	✱✱	1988	✱✱✱✱✱
1951	✱✱✱✱	1970	✱✱✱✱✱	1989	✱✱
1952	✱✱✱	1971	✱✱✱	1990	✱✱✱✱✱
1953	✱✱✱	1972	✱	1991	✱✱✱✱
1954	✱✱	1973	✱✱✱	1992	✱✱
1955	✱✱✱✱✱	1974	✱✱	1993	✱✱✱✱
1956	✱✱	1975	✱✱✱✱✱	1994	✱✱✱✱
1957	✱✱✱✱	1976	✱	1995	✱✱✱✱✱
1958	✱✱✱✱	1977	✱✱✱✱	1996	✱✱✱
1959	✱✱✱	1978	✱✱✱✱	1997	✱✱✱✱✱
1960	✱✱✱	1979	✱✱✱✱	1998	✱✱✱✱
1961	✱✱✱✱✱	1980	✱✱✱✱	1999	✱✱✱✱
1962	✱✱✱✱	1981	✱✱✱	2000	✱✱✱
1963	✱✱✱	1982	✱✱✱✱		

In questa prospettiva, l'impiego di indici in grado di descrivere sinteticamente alcune caratteristiche del clima dell'ambiente di coltivazione permette di fornire un utile strumento di conoscenza su cui basare molte scelte agronomiche e colturali (Azzi, 1933; Mancini, 1999). Tra i più importanti studi legati alla viticoltura, possiamo ricordare quelli di Amerine e Winkler che tra gli anni '40 e '50, mediante l'applicazione di un indice bioclimatico basato sulla temperatura, classificarono la California in cinque zone a diversa vocazione viticola (Winkler *et al.*, 1962). Nello stesso periodo Branas (1974), sempre con l'obiettivo di mettere in risalto le capacità produttive dei territori viticoli, propose un indice eliotermico che prende in considerazione le temperature medie efficaci e la durata quotidiana dell'irraggiamento nel periodo favorevole. Un metodo diverso per calcolare un indice eliotermico, ma sempre con l'obiettivo di rilevare le potenzialità vitivinicole dei territori, è stato proposto più recentemente da Huglin (1986). Negli ultimi anni, altri indici sono stati proposti sulla base di analoghe considerazioni, cercando di adattare le relazioni fra clima e viticoltura ai diversi ambienti di produzione (Fregoni *et al.*, 2002).

Molti di questi indici hanno trovato applicazione negli studi di zonazione viticola, ossia nelle indagini finalizzate allo studio del territorio per ripartirlo in zone omogenee, soprattutto relativamente alle interazioni tra ambiente e vitigni, al fine di far loro esprime al meglio le potenzialità produttive (Intrieri *et al.*, 1993; Fregoni *et al.*, 1998).

Recentemente, al fine di associare le condizioni generali di circolazione dell'atmosfera al ciclo della vite, svincolandosi dai dati puntuali rilevati dalle stazioni a terra, sono stati utilizzati alcuni indici climatici, quali il North Atlantic Oscillation Index (NAO), il Southern Oscillation Index (SOI), l'Arctic Oscillation Index (AO); inoltre sono stati impiegati dati osservati nell'atmosfera, ottenuti da modelli di reanalisi, quali l'altezza del geopotenziale, la distribuzione della pressione al livello del mare, la temperatura superficiale del mare (SST), etc. (Esteves e Manso Orgaz, 2001; Grifoni *et al.*, 2003).

Su queste basi la ricerca è stata condotta con l'obiettivo di analizzare mediante indici bioclimatici e climatici l'effetto della variabilità meteo-climatica osservata negli ultimi decenni sulla qualità del vino "Brunello di Montalcino". I risultati ottenuti sono quindi stati utilizzati per descrivere la possibile evoluzione della produzione enologica nei prossimi anni in seguito ai previsti cambiamenti climatici. Le relazioni ottenute potranno rappresentare la base per lo sviluppo di un sistema d'analisi e previsione della qualità a disposizione degli operatori del settore.

Materiali e metodi

Valutazione qualitativa del vino
La qualità del vino è un elemento complesso dipendente da un gran numero di variabili come le caratteristiche chimiche dell'uva, il metodo di trasformazione adottato, etc. Può essere determinata mediante analisi chimiche sia sull'uva che sul vino stesso, utilizzando analisi strumentali (gas cromatografia in combinazione con sensori artificiali tipo l'olfattometro). Queste analisi forniscono una valutazione oggettiva in termini di quantità di componenti presenti correlabili con la qualità (Bertrand *et al.*, 2000; Bertuccioli, 2000).
In alternativa, l'altro sistema per la determinazione della qualità del vino è quello dell'analisi sensoriale che si basa sulla valutazione delle sue proprietà per mezzo di caratteristiche visive, olfattive e gustative. Questo tipo di analisi permette di verificare la capacità del vino di rispondere alle principali esigenze del mercato e quindi rappresenta una sintesi di tutti gli elementi che compongono il prodotto enologico. Inoltre, sono disponibili serie storiche di valutazioni sensoriali, la cui analisi consente una completa descrizione delle possibili modificazioni che si sono avute nel corso degli anni e delle eventuali correlazioni esistenti con le condizioni climatiche.
La qualità del Brunello di Montalcino (Siena) viene annualmente descritta dal Consorzio con un indice sintetico che si basa su analisi sensoriali ed è espresso in numero di stellette che variano da 1 a 5 (tab. 1). Questa valutazione, risultato di analisi comparate e standardizzate, per il periodo 1945-2000 è stata utilizzata nel presente studio come variabile dipendente per studiare le correlazioni con gli indici climatici e bioclimatici (tab. 2).

Dati meteorologici
In mancanza di una serie storica completa per la stazione di Montalcino, sono stati utilizzati i dati di 6 stazioni collocate nei pressi dell'areale di produzione del Brunello, messe a disposizione dalla banca dati dell'Istituto di Biometeorologia del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Di queste, 4 sono distanti meno di 25 km e 2 rientrano in un raggio minore di 45 km dall'area di studio (fig. 1, tab. 3). La scelta delle stazioni è stata preliminarmente valutata sulla base dei valori medi, delle deviazioni standard e delle correlazioni fra le stazioni calcolate per ciascun anno e per le intere serie storiche. In particolare per le temperature il coefficiente di variabilità (deviazione standard/media) è risultato mediamente pari al 13% e le stazioni sono risultate fra loro significativamente correlate. Per quanto riguarda le precipitazioni è stato necessario escludere la stazione di Grosseto in quanto caratterizzata da regime pluviometrico non correlato con le altre stazioni presenti nell'area di studio. Il coefficiente di variabilità si è attestato intorno ad un valore medio del 15%.
Per queste 6 stazioni sono disponibili i dati termo-pluviometrici dal 1951 al 1997. Le serie storiche sono state completate per il periodo di studio utilizzando i dati delle *reanalysis* (punto Lat. 42° 30'; Lon. 10° 00' NCEP/NCAR) calibrate mediante approccio empirico descritto in dettaglio successivamente a proposito dei dati degli scenari futuri. Le relazioni con la qualità sono state analizzate considerando il valore medio delle stazioni selezionate, al fine di ottenere una descrizione rappresentativa della variabilità interannuale del clima dell'area di produzione del Brunello di Montalcino.

Tab. 3 - coordinate geografiche e quota delle stazioni meteorologiche impiegate nello studio e di Montalcino.
Tab. 3 - *geographical coordinates and elevation of meteorological stations used in this study and of Montalcino.*

Stazione	Lat (°)	Long (°)	Quota (m s.l.m.)
Montalcino	43.05	11.48	564
Asciano (Monteoliveto)	43.18	11.52	401
Casteldelpiano	42.90	11.53	639
Grosseto	42.75	11.12	8
Montepulciano	43.08	11.77	605
Pienza	43.08	11.68	499
Siena	43.32	11.31	348
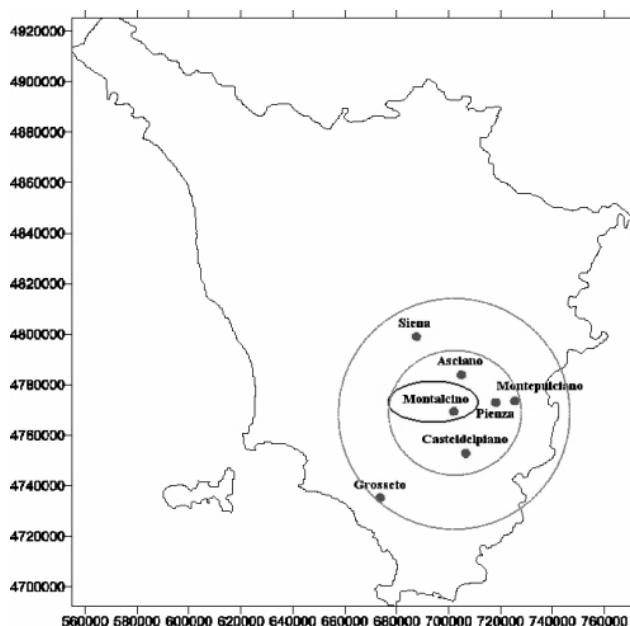
Fig. 1 - posizione delle stazioni meteorologiche impiegate rispetto a Montalcino. Le coordinate sono proiettate in UTM fuso 32 Nord, Datum ED 50.
Fig. 1- *position of used weather stations and Montalcino area. Coordinates are projected in fuse 32 North UTM, Datum ED 50.*

Indici bioclimatici
I dati meteorologici sono stati utilizzati per calcolare indici bioclimatici in grado di definire la vocazionalità potenziale dei territori viticoli. Per questo studio sono stati impiegati indici termici e pluviometrici di carattere generale, quali la somma delle temperature attive (STA), che per il periodo aprile-ottobre prende il nome di Indice di Winkler (WI), l'Indice di Huglin (HI), la somma delle

Tab. 4 - indici bioclimatici impiegati.
Tab. 4 *- applied bioclimatic indices.*

Indici pluviometrici	• precipitazioni mensili • somma delle precipitazioni annuali • somma delle precipitazioni periodo aprile-settembre • somma delle precipitazioni periodo luglio-settembre • somma delle precipitazioni periodo aprile-ottobre • numero giorni di pioggia periodo aprile-settembre
Indici termici	• somma delle temperature attive per i mesi aprile - ottobre • somma delle temperature attive periodo aprile-ottobre • indice di Huglin per i mesi da aprile a settembre • indice di Huglin

precipitazioni nel periodo vegetativo aprile-settembre ($P_{apr-set}$). Per un'analisi più dettagliata, tali indici sono stati calcolati anche per i singoli mesi e per i periodi nei quali la qualità finale risulta maggiormente legata alle condizioni atmosferiche (tab. 4).

$$WI = \sum_{apr}^{ott} (T_{media-gg} - 10°C)$$

$$HI = \sum_{apr}^{set} \frac{(T_{media-gg} - 10°C) + (T_{massima-gg} - 10°C)}{2} \times K$$

$$P_{apr-set} = \sum_{apr}^{set} P_{gg}$$

Dove:
WI = indice di Winkler (gradi giorno),
$T_{media-gg}$ = temperatura media giornaliera dell'aria (°C),
$T_{massima-gg}$=temperatura massima giornaliera dell'aria(°C),
HI = indice di Huglin,
$P_{apr-set}$ = precipitazioni cumulate nel periodo aprile settembre (mm),
P_{gg} = precipitazione giornaliera (mm),
K = coefficiente di latitudine.

L'indice di Winkler (Winkler *et al.*, 1962) e l'indice di Huglin (Huglin, 1986) sono impiegati in viticoltura per descrivere le disponibilità termiche dei territori. Elevati valori di tali indici sono indicati per vitigni a maturazione tardiva, viceversa basse disponibilità termiche si adattano bene vitigni a maturazione precoce. Di conseguenza la variazione inter-annuale delle disponibilità termiche è strettamente legata alla qualità del vino prodotto da un determinato vitigno.
Le piogge cumulate sono state calcolate sommando la pioggia nei vari periodi considerati. Anche in questo caso i risultati produttivi variano annualmente i relazione al regime pluviometrico che può quindi modificare la qualità finale (Fregoni, 1998).
Gli indici bioclimatici e qualitativi sono stati analizzati per mezzo di correlazioni lineari singole e multiple, impiegando i primi come variabile indipendente e la valutazione qualitativa come variabile dipendente. La valutazione della correlazione è stata fatta attraverso il coefficiente di determinazione e il livello di significatività.

Indice NAO
L'Indice NAO è stato ottenuto dal NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, USA (http://www.cdc.noaa.gov). Questo viene definito come la differenza normalizzata delle anomalie di pressione atmosferica fra le Azzorre e l'Islanda. Nell'emisfero nord il NAO dei mesi invernali mostra una significativa correlazione con le temperature e le precipitazioni (Hurrell e Van Loon, 1997; Osborn *et al.*, 1999). Anche in questo caso l'analisi della regressione è stata utilizzata per determinare la relazione fra qualità e condizioni meteorologiche dei singoli mesi. Per il periodo nel quale è stata evidenziata la correlazione più alta è stata inoltre realizzata la mappa di correlazione sull'area Europa/Nord Africa fra la qualità e la pressione al livello del mare. Tale mappa è stata elaborata con la procedura proposta dal Climate Diagnostic Center (CDC) al sito http://www.cdc.noaa.gov/.

Scenari futuri
Il modello globale di circolazione (GCM) utilizzato per la generazione degli scenari è l'HadCM3 sviluppato dall'Hadley Center (UK). Tale modello può essere considerato lo stato dell'arte dei modelli climatici in quanto presenta l'accoppiamento atmosfera-oceano. All'interno dell'HadCM3 l'atmosfera è schematizzata attraverso 19 livelli con risoluzione orizzontale di 2.5° in latitudine e 3.75° in longitudine dando origine ad una griglia globale costituita da 96x73 celle.
Gli scenari hanno origine da ipotesi di evoluzione della concentrazione dei gas-serra in atmosfera a sua volta determinate a partire da quattro grandi ipotesi legate a variabili sociopolitiche. I due profili utilizzati in questo lavoro sono quelli moderati, cioè l'A2-Global Sustainability (Conservazionista-globalizzato) e il B2-Local Stewardship (Conservazionista-localista).
I dati di scenario a scala globale sono poi stati calibrati sulla particolare situazione locale per mezzo di operazioni di *downscaling* di tipo empirico, applicate anche per i dati delle *reanalyisis*. Il primo passo è consistito nella generazione di una serie di scenari locali a partire dai dati del GCM. Nel nostro caso è stata utilizzata la tecnica della Triangulated Irregular Network (TIN), ottenendo in uscita una serie sintetica per ciascuna stazione di interesse. Successivamente si è proceduto alla calibrazione di tale serie a partire dal valore medio delle stazioni meteorologiche utilizzate, considerato rappresentativo del territorio di produzione del Brunello. Dopo aver ordinato per rango le serie di scenario ed osservate per ciascun mese, si è dunque proceduto alla stima del modello lineare che garantisce il miglior accordo tra i dati di scenario e i dati osservati. Infine, è stato applicato il modello ai dati di scenario giornaliero ottenendo così la serie di scenario calibrata. In questa fase sono stati usati degli specifici filtri a garanzia del fatto che il prodotto finale rispondesse il più possibile alla realtà meteo-climatica locale. Per le temperature sono stati perciò moderati i valori estremi

forniti dallo scenario, mentre per le precipitazioni, poiché gli scenari sovrastimano i giorni piovosi, è stato introdotto un processo markoviano per eliminare, secondo un peso probabilistico e in modo assolutamente casuale, un certo numero di giorni di pioggia.

Risultati e discussione

Correlazione tra qualità e indici bioclimatici

Per quanto riguarda gli aspetti termici, l'analisi della correlazione è stata effettuata, per le singole stazioni, con le sommatorie delle temperature attive e l'indice di Huglin, calcolati sia sull'intera stagione che su sottoperiodi. I valori più elevati del coefficiente di determinazione sono stati ottenuti per la sommatoria delle temperature attive classica, corrispondente all'indice di Winkler (periodo aprile-ottobre) (tab. 5).

La stessa analisi è stata svolta impiegando le precipitazioni cumulate. Le migliori correlazioni sono state ottenute, anche in questo caso, per il periodo che copre l'intera stagione vegetativa, ossia aprile - settembre, seguito per importanza dal sottoperiodo che comprende le fasi di invaiatura e maturazione dell'uva, ossia i mesi di luglio – settembre (tab. 6).

Individuati così i migliori indici, sulla base di quelli che hanno mostrato le maggiori correlazioni con ciascuna stazione, sono stati analizzati in dettaglio i singoli effetti riferiti all'intero areale di produzione del Brunello di Montalcino. E' così possibile osservare che la relazione con la temperatura è direttamente proporzionale (fig. 2), con probabilità di avere qualità migliori all'aumentate dell'accumulo termico disponibile nella stagione vegetativa (R^2=0.202, p=0.001). Le precipitazioni mostrano (fig. 3), invece, un'influenza negativa sulla qualità, con una diminuzione della possibilità di avere annate ottime o eccezionali quando le precipitazioni sono elevate (R^2=0.221, p=0.001). Questi risultati sono stati confermati dall'analisi d'indipendenza basata su tabelle di contingenza ottenute riducendo a classi le variabili quantitative. In particolare per quanto riguarda WI il test del χ^2 ha mostrato una significatività pari a 0.017 e pari a 0.021 per le precipitazioni cumulate fra aprile e settembre.

Combinando i due indici, la significatività della regressione multipla risulta elevata (p<0.001) e il coefficiente di determinazione evidenzia come il regime termo-pluviometrico sia responsabile del 30% della variabilità interannuale nella qualità del vino prodotto nella zona del Brunello secondo il modello:

$$Q = (0.00221 \times WI) + (-0.00530 \times P_{apr-set}) + 1.55373$$

Dove: Q = qualità del vino (*), WI = indice di Winkler (gradi giorno), $P_{apr-set}$ = precipitazioni cumulate nel periodo aprile settembre (mm)

Tab. 5 - valori del coefficiente di determinazione (R^2) delle regressioni tra gli indici termici e la qualità del Brunello di Montalcino.
Legenda: WI=indice di Winkler, STA=somma delle temperature attive, HI=indice di Huglin. In grassetto sono evidenziati i migliori R^2 per ciascuna stazione. I valori di significatività al 5%, 1% e 0.1% del coefficiente di determinazione (45 gdl) sono rispettivamente: 0.083, 0.138, 0.216.

Tab. 5 *- determination coefficient (R^2) between wine quality and temperature indices.*
Legend: WI = Winkler Index, STA = degree day accumulation, IH = Huglin Index. The higher values of R^2 for each weather station are highlighted. Significance levels at 5%, 1% e 0.1% of determination coefficient (45 dof) are respectively: 0.083, 0.138, 0.216.

Indice bioclimatico	Monte Oliveto	Castel-delpiano	Grosseto	Montepulciano	Pienza	Siena
WI	0.153	**0.176**	**0.128**	**0.191**	0.092	**0.200**
STA apr	0.008	0.008	0.000	0.001	0.004	0.019
STA mag	0.003	0.008	0.000	0.018	0.000	0.010
STA giu	0.027	0.053	0.028	0.055	0.022	0.085
STA lug	0.124	0.107	0.071	0.081	**0.106**	0.092
STA ago	0.033	0.040	0.082	0.039	0.050	0.096
STA set	0.112	0.080	0.119	0.127	0.069	0.144
STA ott	**0.166**	0.134	0.112	0.099	0.039	0.111
HI	0.115	0.153	0.083	0.163	0.080	0.175
HI apr	0.014	0.020	0.002	0.002	0.004	0.011
HI mag	0.002	0.011	0.000	0.022	0.000	0.006
HI giu	0.033	0.051	0.025	0.045	0.024	0.080
HI lug	0.144	0.140	0.077	0.081	0.102	0.115
HI ago	0.027	0.050	0.050	0.034	0.037	0.082
HI set	0.125	0.094	0.114	0.135	0.059	0.158

Tab. 6 - valori del coefficiente di determinazione delle regressioni tra gli indici pluviometrici e qualità del Brunello di Montalcino.
Legenda: P=somma delle precipitazioni. In grassetto sono evidenziati i migliori coefficienti di determinazione per ciascuna stazione. I valori di significatività al 5%, 1% e 0.1% del coefficiente di determinazione (45 gdl) sono rispettivamente: 0.083, 0.138, 0.216.

Tab. 6 *- determination coefficients (R^2) between wine quality and precipitation indices.*
Legend: P = rainfall summation. The higher values of R^2 for each weather station are highlighted. Significance levels at 5%, 1% e 0.1% of determination coefficient (45 dof) are respectively: 0.083, 0.138, 0.216.

Indice bioclimatico	Monte Oliveto	Castel-delpiano	Grosseto	Montepulciano	Pienza	Siena
P apr	0.041	0.002	0.032	0.018	0.020	0.018
P mag	0.012	0.064	0.001	0.004	0.001	0.011
P giu	0.003	0.007	0.019	0.009	0.050	0.001
P lug	0.078	0.094	0.050	**0.210**	0.071	0.114
P ago	0.012	0.035	0.010	0.000	0.028	0.058
P set	0.078	0.079	0.092	0.069	0.094	0.129
P ott	0.010	0.033	0.002	0.000	0.000	0.022
P apr-set	**0.146**	**0.156**	**0.152**	0.170	**0.188**	0.210
P lug-set	0.118	0.140	0.116	0.137	0.144	**0.246**
P lug-ott	0.112	0.037	0.053	0.087	0.102	0.192
P annua	0.076	0.005	0.033	0.042	0.081	0.082
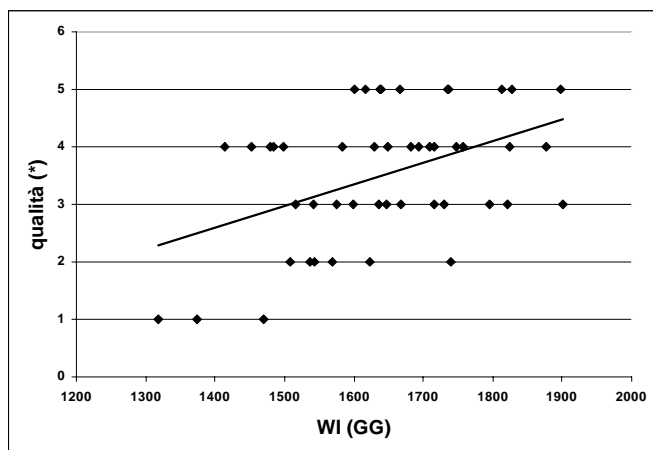
Fig. 2 - relazione tra indice di Winkler (WI) e qualità del Brunello. Legenda: GG=gradi giorno (°C).
Fig. 2 - *Winkler index (WI) versus quality of Brunello di Montalcino wine. Legend: GG=degree days (°C).*
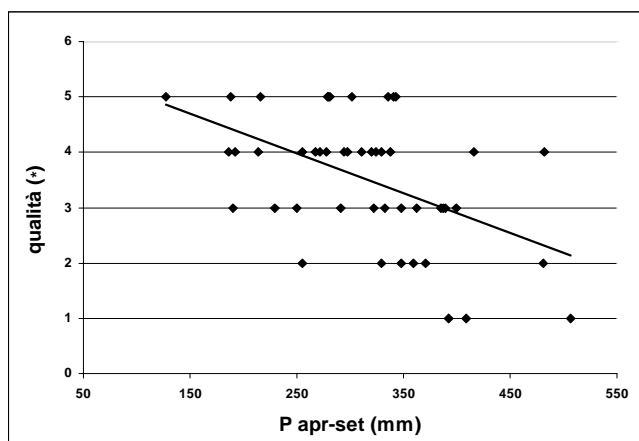
Fig. 3 - relazione tra precipitazioni nel periodo aprile - settembre e qualità del Brunello.
Fig. 3 - *rainfall summation during the period April – September versus quality of Brunello di Montalcino wine.*
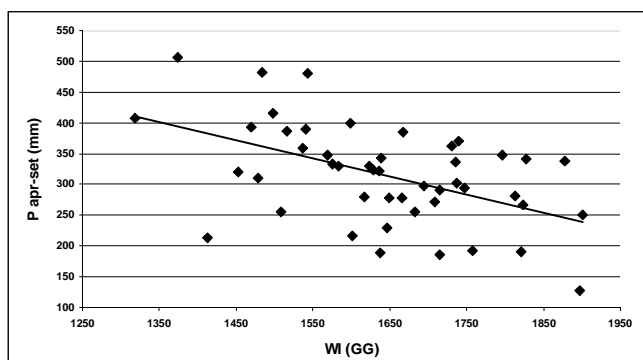
Fig. 4 - relazione tra l'indice di Winkler (WI) e somma delle precipitazioni nel periodo aprile – settembre.
Legenda: GG=gradi giorno (°C).
Fig. 4 - Winkler index (WI) versus rainfall summation during the period April – September.
Legend: GG=degree days (°C).

Appare inoltre interessante evidenziare come i due indici impiegati sono risultati molto correlati tra loro con $R^2 = 0.25$ e $p<0.001$ (fig. 4). Infatti ad annate con elevate disponibilità termiche sono corrisposti bassi valori delle precipitazioni e viceversa, facendo si che le probabilità che entrambi i fattori climatici risultino nello stesso anno favorevoli (o sfavorevoli) sia elevata.

Al fine di evidenziare la variabilità climatica osservata negli ultimi anni e gli effetti sulla qualità, è stata calcolata la differenza annuale dei due indici rispetto alla media climatica di riferimento relativa al periodo 1961-1990. I risultati hanno mostrato un aumento di frequenza delle annate con valori di WI sopra la media nell'ultima decade del periodo analizzato (fig. 5a), mentre per le precipitazioni non è possibile rilevare la presenza di particolari *trend* (fig. 5b). La migliore qualità della produzione evidenziata negli ultimi anni (tab. 2) sembra quindi climaticamente imputabile soprattutto ad una più elevata disponibilità termica.

Analisi degli indici climatici

La correlazione fra l'indice NAO e la qualità del Brunello di Montalcino ha mostrato i maggiori valori dei coefficienti di determinazione per i mesi di aprile (R^2 = 0.063, p=0.090) e maggio (R^2 = 0.067, p=0.078) e in en-
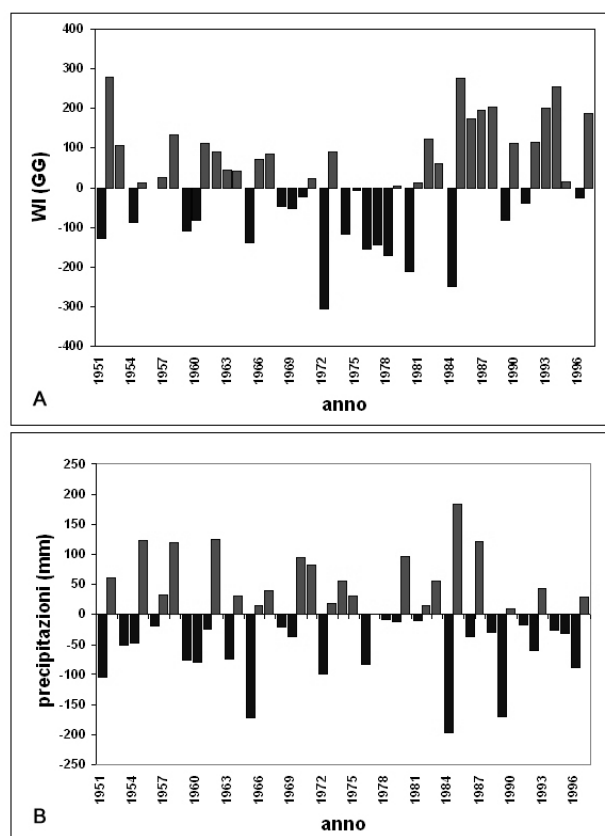
Fig. 5 - variabilità, rispetto alla media 1961 – 1990, dell'indice di Winkler (WI) (A) e delle precipitazioni nel periodo aprile - settembre (B). Legenda: GG=gradi giorno (°C).
Fig. 5 - *deviations from the climatic average 1961-1990 of Winkler index (WI) (A) and rainfall summation during the period April – September (B).*
Legend: GG=degree days (°C).

trambi i casi la correlazione è stata inversamente proporzionale. Il valore medio di questi due mesi è stato impiegato per sviluppare una nuova correlazione (fig. 6) che è risultata statisticamente significativa (R^2 = 0.13, p = 0.018).
Per ottenere una conferma delle relazioni esistenti fra la qualità del Brunello di Montalcino e la distribuzione dei campi di pressione sull'area atlantica, precedentemente espressa dal NAO, nel periodo oggetto di studio è stata elaborata la mappa delle correlazioni riportata in figura 7, che ha confermato la sensibilità della qualità ai livelli di pressione al suolo che si stabiliscono su Azzorre ed Islanda. Dall'analisi della mappa emerge che migliori correlazioni, rispetto a quelle ottenute con il NAO, potrebbero probabilmente essere ottenute impiegando campi di pressione ad ovest delle Azzorre e dell'Islanda.
I risultati così ottenuti possono avere importanti applicazioni previsionali, in quanto già nelle prime fasi della stagione vegetativa sarà possibile ottenere indicazioni sulla qualità della produzione. Ciò consentirà di intervenire per ottimizzare la commercializzazione e aumentare la qualità in annate meteorologicamente sfavorevoli.

Fig. 6 - relazione fra la qualità del Brunello di Montalcino e l'indice NAO medio per i mesi di aprile e maggio.
Fig. 6 *- NAO index of April – May period versus quality of Brunello di Montalcino wine.*
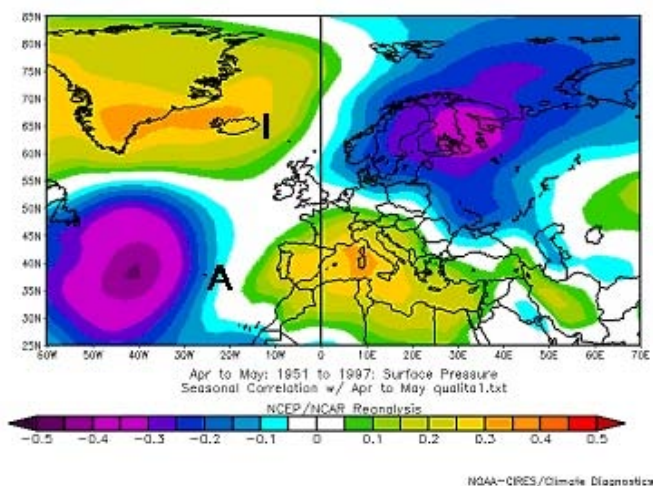
Fig. 7 - mappa di correlazione fra la qualità del Brunello di Montalcino e la pressione al suolo per il periodo aprile - maggio. I colori rappresentano i coefficienti di correlazione. Le mappe sono state ottenute grazie al NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, USA (http://www.cdc.noaa.gov/).
Fig. 7 *- correlation map between quality of Brunello di Montalcino wine and surface pressure for the period April – May. Maps have been obtained from NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, USA (http://www.cdc.noaa.gov).*

Possibili scenari futuri al 2050

I due indici bioclimatici, calcolati sui valori di temperatura e di precipitazioni ottenuti dall'analisi degli scenari futuri, sono stati messi a confronto con gli andamenti passati. La somma delle temperature attive ha mostrato un forte trend di incremento, per i prossimi 50 anni e peraltro tale tendenza è bene evidente anche per gli ultimi 10 anni di dati misurati (fig. 8a). Per le precipitazioni i valori sono maggiormente discordanti: dopo una fase senza tendenze ben marcate sembra esserci una diminu-
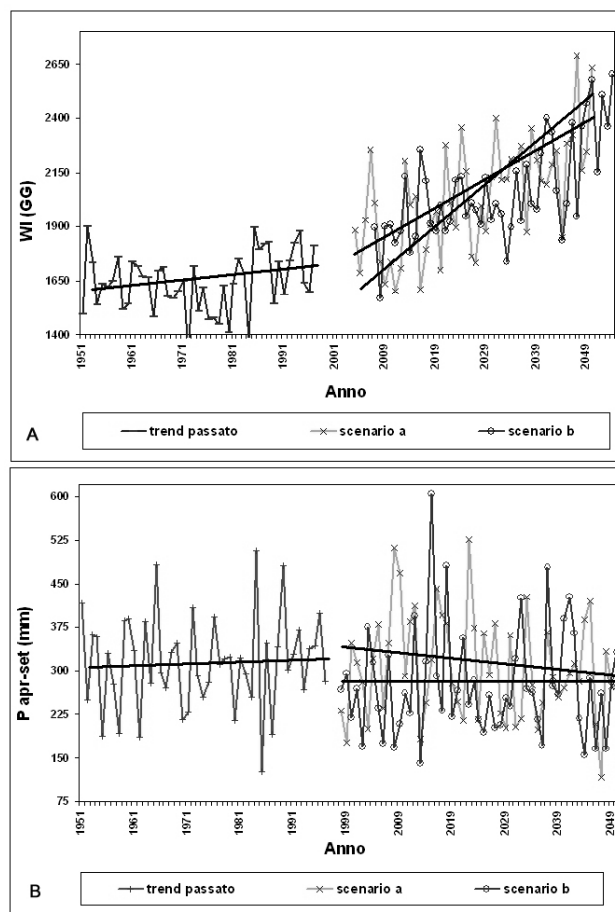
Fig. 8 - andamento passato e futuro dell'indice di Winkler (WI) (A) e della somma delle precipitazioni nel periodo aprile – settembre (B). Legenda: GG=gradi giorno (°C).
Fig. 8 *- future and past climatic trends of Winkler Index (WI) (A) and rainfall summation during the period April – September (B). Legend: GG=degree days (°C).*

zione di valori che conferma i risultati ottenuti precedentemente, in base ai quali ad incrementi delle sommatorie termiche corrispondono decrementi di precipitazioni (fig. 8b). Molto difficile risulta ipotizzare l'impatto di tali cambiamenti climatici sulla qualità del vino, ma in particolare l'effetto delle elevate sommatorie termiche, protratte per più anni, potrebbe essere rilevante.

Conclusioni

Gli indici climatici e bioclimatici adottati hanno evidenziato una correlazione significativa con la qualità del Brunello di Montalcino. In particolare la temperatura ha mostrato di influire positivamente sul prodotto e, almeno nei limiti di variazione attuale, l'analisi dei *trend* climatici ha evidenziato un miglioramento della qualità, soprattutto per un aumento della sommatoria termica per l'intera stagione vegetativa. Nei prossimi anni il mantenimento di questa tendenza incrementale porterà probabilmente ad una eccessiva disponibilità termica con ripercussioni sulla qualità. Per quanto riguarda le precipitazioni, gli eccessi idrici sono risultati negativamente correlati col prodotto finale. L'analisi dei dati meteorologici non ha mostrato particolari tendenze negli ultimi anni, mentre nei prossimi decenni i segnali di riduzione delle precipitazioni possono far ipotizzare il raggiungimento dei limiti inferiori di disponibilità idrica compatibile con una soddisfacente attività viti-vinicola.

È opportuno che questi studi vengano condotti anche in altre realtà produttive per definire le prospettive della viticoltura regionale e nazionale, soprattutto in funzione di un sempre maggiore sviluppo dei modelli di simulazione degli scenari futuri e quindi di una loro maggiore attendibilità. In questo modo sarà possibile individuare gli interventi necessari a gestire i cambiamenti, riducendo le conseguenze negative per la produzione e valorizzando i possibili effetti positivi.

Particolarmente importante è inoltre la possibilità di approfondire lo studio, soprattutto relativo agli indici climatici generali (NAO, AO, etc.), in quanto questi sono in grado di descrivere nel complesso l'evoluzione delle condizioni atmosferiche a grande scala. La loro applicazione potrà quindi fornire importanti indicazioni anche per prevedere la qualità del vino e fornire così agli operatori (agricoltori, tecnici, ricercatori e amministratori pubblici) un importante supporto per migliorare le loro tecniche produttive e commerciali.

Ringraziamenti

Si ringrazia il "Consorzio Del Vino Brunello Di Montalcino" per aver fornito la valutazione qualitativa delle annate, come riportato nel presente articolo.

Bibliografia

Azzi, G., 1933. Gli equivalenti meteorologici e la climatologia agraria. Met. Pratica, 14, n° 1.

Beniston, M., Tol, R. S. J., Decolle, R., Hormann, G., Iglesias, A., Innes, J., Mc Michael, A. J., Martens, A. J. M., Nemesova, I., Nicholls, R. J., Toth, F. L., 1998. Europe. In: The Regional Impacts of Climate Change – An Assessment of Vulnerability (ed. Watson, R. T., Zinyowera, M. C., Moss, R. H.) Special Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 289-324

Bertrand, A., Kotserids, Y., Guedes de Pinho, P., 2000. Il ruolo dei componenti delle uve sulla qualità del vino. Atti del International Symposium "Il Sangiovese". Firenze 15-17 febbraio 2000, 341-362.

Bertuccioli, M., 2000. Qualità sensoriale. In "Contributo della scuola italiana al progresso delle scienze vitivinicole" volume 2. Accademia italiana della vite e del vino, 318-340.

Bindi, M., Triossi, A., Moriondo, M., 2002. Mutamenti climatici e produzione viticola europea. L'Informatore Agrario 45, 31-34.

Branas, J., 1974. Viticulture. Impr. Dèhan, Montpellier.

Costacurta, A., Roselli, G., 1980. Fattori climatici ed edafici che condizionano gli impianti dei vigneti. Rivista di viticoltura e di enologia di Conegliano. Anno 33°, n° 10, 469 – 480.

Esteves, M. A., Manso Orgaz, M. D., 2001. The influence of climatic variability on the quality of wine. Int. J. Biometeorol. 45, 13-21.

Fregoni, M., 1998. Viticoltura di qualità. Edizioni L'Informatore Agrario, Verona.

Fregoni, M., Biondi Santi, F., Pezzato, S., 2002. L'indice bioclimatico di qualità Fregoni applicato al Brunello di Montalcino. L'Informatore Agrario 22, 53-54.

Fregoni, M., Zamboni, M., Venturi, A., Vespignani, G., Laruccia, N., Simoni, M., Zinoni, F., Soldi, A., 1998. La zonazione viticola della Collina cesenate. Vignevini 1|2, 39-57.

Grifoni, D., Mancini, M., Orlandini, S., Rossi, M., Zipoli, G., 2003. Analysis of grapevine production using some meteorological indices. In Atti del "Sixth European Conference on Applications of Meteorology". Roma 15-19 settembre 2003 (CD-ROM).

Huglin, P., 1986. Biologie et écologie de la vigne. Payot Lousanne, Parigi.

Hurrell, J.W., Van Loon, H., 1997. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure. Clim Change 36, 301-326.

Intrieri, C., Filippetti, I., Silvestroni, O., Marchigiani, E., Murri, A., 1993. Zonazione bioclimatica e primi rilievi fenologici nella viticoltura della regione Marche. Vignevini 6, 62-70.

Manaresi, A., 1946. Trattato di Viticoltura. Edizioni agricole, Bologna.

Mancini, M., 1999. La caratterizzazione microclimatica di un'area viticola della Toscana. Tesi di laurea, Università degli Studi di Firenze – Facoltà di Agraria, AA 1998-1999.

Maracchi, G., 2003. Meteorologia e Climatologia applicate. Editrice L'Universo, Istituto Geografico Militare, Firenze.

Osborn, T.J., Briffa, K.R., Tett, S.F.B., Jones, P.D., Trigo, R.M., 1999. Evaluation of the North Atlantic Oscillation as simulated by a coupled model. Lim. Dyn., 15, 685-702.

Winkler, A., Cook, J. A., Klìewer, W. M., Lider, L. A., 1962. General Viticulture. University of California Press.

RADIAZIONE SOLARE GLOBALE GIORNALIERA: CORREZIONE DEI DATI ARCHIVIATI E STIMA DEI DATI MANCANTI PER LA STAZIONE AGRO-METEOROLOGICA DI SAN PIETRO CAPOFIUME (BO)

DAILY GLOBAL SOLAR RADIATION: CORRECTION OF ARCHIVED DATA AND ASSESSMENT OF MISSING DATA FOR THE AGROMETEOROLOGICAL STATION OF SAN PIETRO CAPOFIUME, BOLOGNA, ITALY.

Andrea Pammolli[1], Vittorio Marletto[1]*

[1]*: Arpa Emilia-Romagna, Servizio IdroMeteorologico, Area Agrometeorologia e Territorio, v.le Silvani 6, 40122 Bologna*
* *Corresponding author, tel. +39 051 6497564, fax +39 051 6497501, e-mail: vmarletto@arpa.emr.it*

Ricevuto 4 febbraio 2005, accettato 4 luglio 2005

Riassunto
In questo lavoro viene illustrato il metodo utilizzato per correggere e completare una serie di dati giornalieri di radiazione solare globale. L'analisi è stata condotta utilizzando un modello matematico con l'ausilio di un programma per la stima dei parametri necessari al modello; poi per mezzo di metodi statistici sono stati calcolati i coefficienti moltiplicativi necessari alla calibrazione del modello. Le stime ottenute dopo la calibrazione sono state estese ai restanti anni della serie storica. Quindi abbiamo corretto i dati misurati su tutto l'arco di tempo e completato i dati mancanti mediante valori stimati dal modello. Il metodo descritto è stato applicato ai dati misurati tra il 1986 e il 2004 su una delle stazioni della rete regionale di ARPA Emilia-Romagna, in cui le misure risultavano particolarmente lacunose e disomogenee. La procedura è stata automatizzata utilizzando il linguaggio VBA (Visual Basic for Applications) per facilitare l'estensione della metodologia anche sui dati delle restanti stazioni regionali.

Parole chiave: metodi statistici, calibrazione, radiazione globale, serie storica, VBA

Abstract
This paper shows the method used to correct and complete a series of daily global radiation data. The analysis was carried out using a mathematical model and with the help of a program providing the parameters needed by the model. One of the model parameters was calibrated and the estimates were then extended to the rest of the time series. All the measured data were corrected and completed with the estimates. The method described was applied to data measured between 1986 and 2004 in one of the stations belonging to the regional network of ARPA Emilia-Romagna, where quite a number of data were missing and the present ones looked rather inhomogeneous. The procedure used was implmented in VBA (Visual Basic for Applications) in order to make it available for application to the other regional stations.

Keywords: *statistical methods, calibration, global radiation, time series, VBA.*

Introduzione

La radiazione solare globale è misurata a terra su un piano orizzontale ed è l'integrale giornaliero del flusso di radiazione proveniente direttamente dal disco solare e di quella diffusa dal cielo per effetto delle nubi e dei gas costituenti l'atmosfera. Si tratta di una grandezza di notevole interesse climatologico e agrometeorologico, utilizzata anche in applicazioni modellistiche di simulazione della fotosintesi e del bilancio idrico. A differenza di altre grandezze misurate dai Servizi meteorologici, quali temperatura, precipitazione, umidità, ecc., per le quali è comunemente previsto un sistema automatizzato di controllo qualità dei dati basato su confronti logici, climatologici, temporali e spaziali, per la radiazione globale spesso gli unici controlli effettuati si basano su metodi soggettivi (Zinoni *et al.*, 1999; Pavan *et al.*, 2003). Inoltre, il numero delle stazioni che registrano al suolo tale variabile è molto limitato, specie se confrontato con quelle che registrano temperatura e precipitazioni, e spesso le serie registrate presentano lacune anche ampie. Questo impedisce di impiegare direttamente i dati in studi di carattere agronomico e/o ambientale che prevedono serie ininterrotte e che impongono l'effettuazione di stime accurate dei dati mancanti.
Per queste stime, oltre ad approcci di tipo stocastico (Richardson, 1981), la ricerca ha prodotto modelli che utilizzano relazioni statistiche fra la radiazione globale ed altre variabili meteorologiche. Di particolare rilievo il filone di ricerca che mette in relazione questa variabile con l'escursione termica diurna, iniziato da Hargreaves e Samani (1982a, 1982b) e proseguito da Bristow e Campbell (1984), con successivi sviluppi, ad esempio considerando l'incidenza sulla stima dovuta a fenomeni avvettivi (Donatelli e Bellocchi, 2001).
Infine il problema è stato affrontato da alcuni autori anche da un punto di vista informatico, mettendo a disposizione, anche in Internet, programmi per la stima della radiazione

solare basati sostanzialmente sui modelli precedentemente citati e su altri similari (RadEst, Donatelli *et al.*, 2003; GSRad, Donatelli *et al.*, 2004).
L'analisi qui presentata prende sostanzialmente spunto da uno studio condotto da Rana *et al*. (2004) nel quale si evidenziano metodologie di controllo qualità dei dati basate prevalentemente su metodi statistici applicati a confronti tra i dati acquisiti da una rete e quelli acquisiti mediante apparecchiature di controllo. L'approccio seguito qui non prevede l'effettuazione diretta di misure di controllo ma si basa inizialmente su un esame generale del grafico dei dati di radiazione disponibili, che permette di individuare le discontinuità presenti nei dati, dovute a fenomeni di varia natura (cambiamento o ricalibrazione dei sensori, dei programmi di gestione, dell'hardware di stazione). Tra i dati misurati si individua, per confronto con valori tabulati o con dati di riferimento misurati da altri soggetti (istituti di ricerca), quali siano i periodi di maggiore affidabilità dei dati stessi. Segue una fase in cui i dati di temperatura minima e massima da utilizzarsi per la stima della radiazione con il modello empirico vengono vagliati e completati per mezzo di valori interpolati dalle stazioni limitrofe, al fine di avere a disposizione una serie termica continuativa e affidabile. Una volta stimata la radiazione globale, il passo successivo è quello di identificare all'interno della serie delle misure un anno particolarmente affidabile sul quale operare una regressione lineare fra la radiazione misurata e quella stimata, al fine di ottenere il moltiplicatore di calibrazione complessiva del modello per quella particolare stazione.
Successivamente le estensioni del calcolo dei moltiplicatori ai restanti anni vengono eseguite individuando graficamente e per mezzo del massimo annuale della radiazione gruppi di anni o comunque intervalli di tempo omogenei al loro interno. Quindi le ultime due fasi, correzione dei dati presenti e stima corretta dei dati mancanti, completano lo studio fornendo una serie completa e omogenea di dati di radiazione globale.
Va rilevato che la procedura qui adottata, pur essendosi dimostrata pratica ed efficace ai nostri fini, non mette al riparo da eventuali variazioni tra gli anni della trasmittanza di cielo sereno.

Stima della radiazione solare globale

Illustreremo brevemente il procedimento seguito per la stima della radiazione globale. Dapprima analizzeremo il modello matematico, poi il programma di interpolazione dei dati di temperatura, infine mostreremo alcuni risultati relativi alla stazione oggetto di studio.

Il modello Donatelli - Bellocchi

L'approccio usato consiste nell'applicare un coefficiente adimensionale di trasmittanza atmosferica *t* alla radiazione potenziale giornaliera R_a (MJ m^{-2}), definita come la radiazione che si avrebbe allo strumento in assenza di atmosfera, dipendente da soli fattori geometrici e astronomici. Il modo in cui viene stimata la trasmittanza caratterizza questo modello e lo differenzia dai precedenti.
Per calcolare R_a si definisce il fattore di correzione della distanza terra-sole come

$$E_0 = 1 + 0.0334\, cos(0.01721 i - 0.0552) \qquad (1)$$

dove *i* rappresenta il giorno dell'anno (1 - 366). Poi si calcola l'angolo di declinazione solare (rad):

$$\delta = sen^{-1}\left\{0.39785\, sen\left[4.869 + 0.0172 i + 0.03345\, sen\left(6.224 + 0.0172 i\right)\right]\right\} \qquad (2)$$

e il fotoperiodo (rad):

$$N_i = cos^{-1}\left[-tg(\delta)\, tg(\phi)\right] \qquad (3)$$

dove ϕ rappresenta la latitudine della stazione espressa in radianti. La radiazione potenziale risulta dalla

$$R_a = 117.5\, E_0 \left(\frac{N_i\, sen(\phi)\, sen(\delta) + cos(\phi)\, cos(\delta)\, sen(N_i)}{\pi} \right) \qquad (4)$$

La stima della radiazione globale viene ottenuta come prodotto fra la trasmittanza e la radiazione potenziale

$$R = t\, R_a \qquad (5)$$

dove *t* risulta definita come

$$t_i = \tau \left[1 + f(i)\right] \left[1 - e^{\left(\frac{-b \Delta T_i^2}{\Delta T_w}\right)}\right] \qquad (6)$$

con τ trasmittanza atmosferica in condizioni di cielo sereno, *b* coefficiente dell'escursione termica, ΔT e ΔT_w rispettivamente escursione termica giornaliera (°C) e sua media mobile semplice centrata di ordine sette, e con

$$\Delta T_i = T_x(i) - \frac{\left(T_n(i) + T_n(i+1)\right)}{2} \qquad (7)$$

dove $T_x(i)$ e $T_n(i)$ sono rispettivamente la temperatura massima e quella minima del giorno i-esimo mentre $T_n(i+1)$ rappresenta la temperatura minima del giorno successivo. Definiamo infine il calcolo delle rimanenti quantità adimensionali

$$f(i) = c_1 \left[sen\left(i\, c_2 \frac{\pi}{180}\right) + cos\left(i\, f(c_2) \frac{\pi}{180}\right) \right] \qquad (8)$$

$$f(c_2) = 1 - 1.90\, c_3 + 3.83\, c_3^2 \qquad (9)$$

con c_1 e c_2 coefficienti di calibrazione e c_3 parte frazionaria di c_2. La media delle minime nell'espressione (7) viene effettuata per tener conto di variazioni sostanziali delle temperature minime tra un giorno e il successivo, dovute a eventuali fenomeni avvettivi (cioè di trasporto di calore associato al movimento di masse d'aria). L'escursione settimanale media ΔT_w ha invece il compito di destagionalizzare la formula, dato che il valore di escursione termica del giorno *i* viene messo a rapporto con quello della settimana corrente.
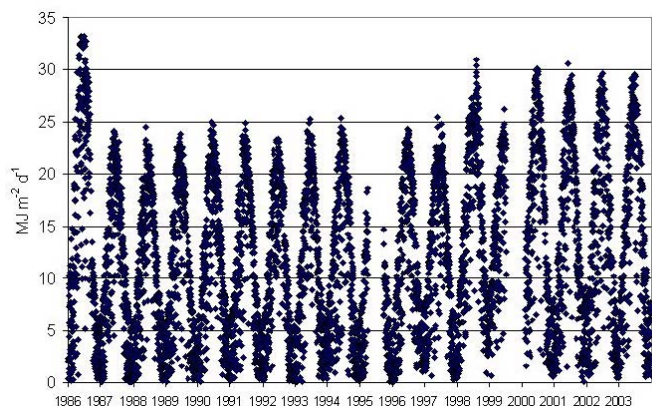
Fig. 1 – Radiazione solare globale giornaliera misurata nella stazione di S. Pietro Capofiume (BO) nel periodo 8/1/1986-21/6/2004.

Fig. 1 *– Daily solar global radiation measured at the station of S. Pietro Capofiume (BO) in the period 8/1/1986-21/6/2004.*

Fig. 2 – Radiazione solare massima annua, minima annua, media annua (asse verticale sinistro) e conteggio dei valori misurati per anno (asse verticale destro) nella stazione di San Pietro Capofiume (BO) tra l’8/1/1986 e il 21/6/2004.

Fig. 2 *– Yearly maximum, minimum, and mean solar radiation (left vertical axis), and number of measures available (right vertical axis) at San Pietro Capofiume (BO) between 8/1/1986 and 21/6/2004.*

Il coefficiente τ caratterizza la trasparenza massima dell’aria nella zona oggetto di studio, mentre *b* determina quanto velocemente cresce *t* al crescere di ΔT. I coefficienti *b*, c_1 e c_2 sono da calibrare zona per zona ma nello studio in questione sono stati adottati i valori forniti da Donatelli e Bellocchi per Modena S. Prospero (risp. 0,103, -0,02 e 1,38), sito centrale rispetto alla rete regionale dell’Emilia-Romagna. Questi valori risultano tutti sostanzialmente centrali rispetto agli intervalli di variazione riscontrati da Donatelli *et al.* (2003) nelle calibrazioni da loro effettuate su 25 stazioni radiometriche italiane (pari risp. a 0,083 ÷ 0,140 per *b*, -0,120 ÷ 0,097 per c_1 e 0,008 ÷ 1,410 per c_2).

Metodo di interpolazione IDWA
(Inverse Distance Weighted Average)

Al fine di ottenere una serie storica continuativa di radiazione, dobbiamo disporre di un vettore continuo di temperature minime e massime. Per ovviare ai problemi di discontinuità delle misure, è stato utilizzato il software di bilancio idrico geografico Criteria (Marletto e Zinoni, 1996), dotato di un interpolatore spaziale che, dai dati di temperatura di stazioni vicine, restituisce quelli mancanti per la stazione in questione.

Solo i dati giornalieri della temperatura che derivavano da un numero di rilevazioni orarie non inferiori a 24 sono stati interpolati per mezzo di Criteria. Il metodo di interpolazione utilizzato prende nome dal modo in cui vengono calcolati i pesi da attribuirsi a ogni misura circostante per determinarne l’effetto sulla stima: i pesi variano con l’inverso di una potenza della distanza dal punto in questione. In Criteria viene creata una griglia a maglie quadrate di lato fissato a piacere, di solito corrispondente alla distanza media tra le stazioni disponibili, e l’interpolazione viene eseguita con i dati di tutte le stazioni situate all’interno di una circonferenza con centro nella maglia dove cade la stazione oggetto di studio e con raggio fissato dall’utente. Il sistema verifica che le stazioni interpolanti siano presenti in ognuno dei quadranti del piano cartesiano centrato sulla maglia di riferimento in numero fissato dall’utente e, infine, opera una media che assegna maggior peso alle stazioni più vicine e minore a quelle lontane ottenendo i valori stimati $\hat{z}$ come segue:

$$\hat{z} = \sum_i w_i z_i \qquad (10)$$

dove z_i è il valore misurato nell’*i-esima* stazione disponibile e i pesi *w* sono definiti come

$$w_i = \frac{1}{d_i^{\alpha} \cdot \sum_i \frac{1}{d_i^{\alpha}}} \qquad (11)$$

con α esponente della distanza tra le stazioni, a scelta dell’utente (di solito 2 o 3).

Il metodo di interpolazione utilizzato è semplice ma senz’altro adatto al problema in questione, data la densità spaziale piuttosto elevata (ca. 20 km) della rete termometrica regionale, la sua disposizione in territorio pianeggiante nell’intorno del sito di lavoro, collocato in posizione centrale rispetto al territorio della regione, quindi senza particolari problemi legati ad effetti di bordo, che comunque in altre applicazioni di Criteria sono mitigati grazie all’accesso ai dati nazionali della rete dell’Aeronautica Militare.

Applicazione alla stazione di S. Pietro Capofiume (BO)

Inizialmente abbiamo riportato su un foglio MS Excel l’intera serie storica estratta dall’archivio dei dati giornalieri ARPA-SIM per la stazione di S. Pietro Capofiume (44,65 N; 11,62 E; 10 m s.l.m.), scelta in quanto sede della più lunga serie di misure di radiazione effettuate dal Servizio Idrometeorologico (8/01/1986 – 21/06/2004), per i seguenti gruppi di variabili:

1) T_n , n, T_{ni} , temperatura minima giornaliera e numero di rilevazioni orarie, temperatura minima interpolata;
2) T_x , x, T_{xi} , temperatura massima giornaliera e numero di rilevazioni orarie, temperatura massima interpolata;
3) R_m , m, radiazione misurata e numero di rilevazioni orarie.
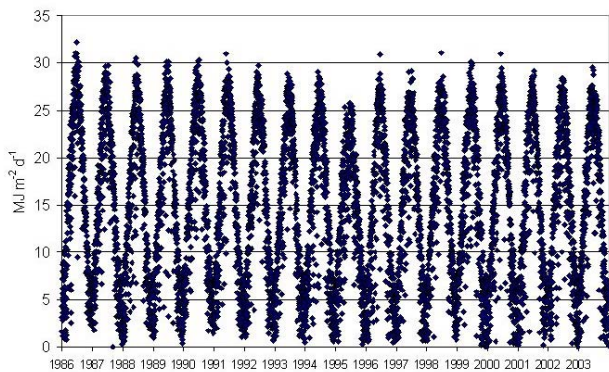
Fig. 3 – Radiazione stimata a S. Pietro Capofiume con il modello Donatelli-Bellocchi (DB) nel periodo 8/01/1986-21/06/2004.

Fig. 3 *– Radiation assessed at San Pietro Capofiume with the Donatelli-Bellocchi (DB) model in the period 8/01/1986-21/06/2004.*
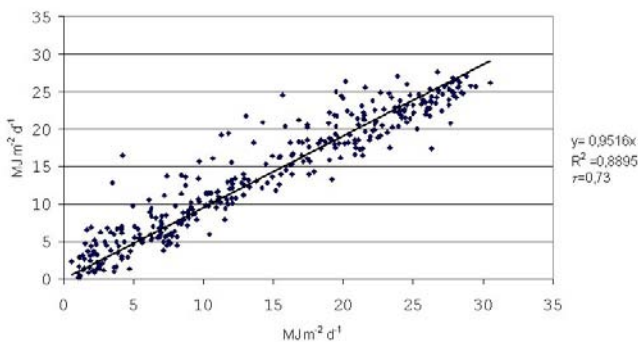
Fig. 4 – Regressione lineare fra la radiazione misurata a S. Pietro Capofiume nel 2001 (in ascissa) e quella stimata con il modello DB (in ordinata).

Fig. 4 *– Linear regression between daily global radiation measured at San Pietro Capofiume in 2001 (horizontal axis) and the one assessed with the DB model (vertical axis).*
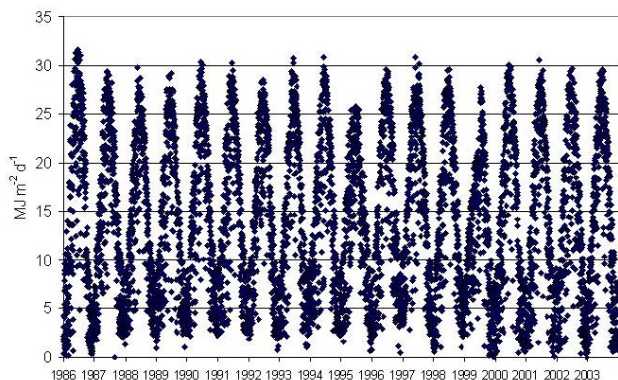
Fig. 5 – Ricostruzione della serie storica della radiazione globale a S. Pietro Capofiume nel periodo 8/01/1986-21/06/2004.

Fig. 5 *– Reconstruction of the global radiation time series for San Pietro Capofiume in the period 8/01/1986-21/06/2004.*

Il grafico in Fig. 1 riporta la situazione iniziale della radiazione globale misurata sulla stazione dopo la rimozione di alcuni valori palesemente assurdi. Come si può vedere la serie presenta delle discontinuità e delle brusche variazioni, in particolare tra il 1986 e il 1987 e tra il 1997 e il 2004. Nei dati sono ben evidenti due situazioni dissimili nei periodi 1987-1997 e 2000-2004. Dalle notizie disponibili queste variazioni sembrano dovute sia a banali errori nei fattori adottati in passato per la conversione dei segnali elettrici in valori di radiazione sia alla sostituzione dello strumento di misurazione (solarimetro Kipp & Zonen) con altro simile opportunamente ricalibrato dalla ditta costruttrice, sia infine alla presenza di un nuovo software di gestione della stazione. Dal 2000 in avanti comunque i dati disponibili risultano sostanzialmente affidabili, salvo la presenza in archivio di numerosi valori giornalieri derivanti da misure orarie incomplete ($m<24$).

Da alcune prove effettuate (Fig. 2) si è verificato che un buon indicatore oggettivo utilizzabile per individuare le discontinuità nell'andamento della radiazione globale risulta essere la radiazione massima annua. Il suo esame conferma quanto evidenziato in precedenza.

Poiché la serie iniziale conteneva più di seicento valori di radiazione globale derivanti da un numero di rilevazioni orarie inferiori a 24 abbiamo scartato questi dati riducendo la numerosità dei dati disponibili dagli iniziali 5619 presentati in Fig. 1 a 4990. La selezione è stato compiuta senza distinguere se i dati erano mancanti di giorno o di notte perché il recupero di questa informazione avrebbe comportato un lungo lavoro di accesso e manipolazione dei file dei dati orari originali, incompatibile con il tempo disponibile.

La figura successiva (Fig. 3) presenta invece il risultato dell'applicazione del modello Donatelli-Bellocchi alla serie completa delle temperature estreme giornaliere di cui in precedenza. Si può vedere come il modello fornisca una serie molto omogenea di dati, con discontinuità locali nei valori massimi, dovute evidentemente ad anomalie termiche negli anni 1986 e 1995, e una lieve tendenza alla diminuzione nei valori minimi invernali.

Il passo successivo è stato quello di selezionare tra le misure un anno particolarmente affidabile su cui calibrare il modello con una regressione lineare passante per l'origine. E' stato scelto il 2001, per la completezza e l'accuratezza dei dati disponibili. I risultati della regressione sono evidenziati nella Fig. 4.

Come si vede il modello DB con i coefficienti di Modena S. Prospero tende a sottostimare i valori misurati. Per riportare le stime sulla diagonale 1:1 il coefficiente di trasmittanza τ originariamente fornito per Modena S. Prospero è stato ricalibrato come $\tau' = \tau/0.9516$. Il nuovo valore così ottenuto (0,77) è stato verificato sugli anni successivi (2002-4) ed è risultato valido, producendo coefficienti angolari delle regressioni tra misure e stime molto prossimi all'unità con coefficienti di determinazione sempre superiori a 0,80.

Ricostruzione della serie storica

Avendo analizzato il fenomeno nell'arco temporale 2000-2004 e visti i soddisfacenti risultati ottenuti, si è ritenuto opportuno estendere il metodo ai restanti anni lavorando sui cinque periodi individuati come omogenei con la pro-

cedura descritta in precedenza, basata sull'esame visivo del grafico dei dati giornalieri e dei valori di radiazione massima annua, che sono risultati i seguenti: 1986, 1987 – 1997, 1/01/1998 – 31/07/1998, 1/08/1998 – 31/12/1998, 1999.

Una volta ottenuti i coefficienti angolari delle varie regressioni siamo passati alla calibrazione dei dati misurati e al completamento dei dati mancanti con quelli stimati dal modello. Così facendo, abbiamo ricostruito l'intera serie storica della stazione (Fig. 5).

Confrontando questo risultato, con i valori del grafico iniziale (Fig. 1), si può notare la mancanza di bruschi "scalini" nei valori massimi annuali e quindi la maggiore omogeneità della serie nel tempo, anche se ora è visibile una certa disomogeneità nei valori minimi, che potrebbe essere probabilmente corretta evitando di forzare a zero l'intercetta della retta di regressione.

Il processo è stato reso semiautomatico grazie ad un programma realizzato in VBA, il quale stima il valore della radiazione solare per una data serie storica sulla base dei dati di temperatura e radiazione misurata e/o interpolata inseriti in un foglio Excel.

Conclusioni

Il presente lavoro ha permesso di ottenere un database completo ed omogeneo di dati di radiazione solare globale per la stazione di San Pietro Capofiume (BO), nella quale le misure, iniziate nel 1986 e tuttora in corso, risultavano particolarmente lacunose e disomogenee, specie fino all'anno 1999. Il modello di Donatelli e Bellocchi (2001) si è rivelato in grado di fornire buone stime della radiazione solare per la stazione oggetto di studio. Sono stati impiegati per le stime i parametri forniti dal software RadEst 3.00 (Donatelli et al., 2003) per il sito di Modena - S. Prospero, dimostrando l'affidabilità degli stessi anche per la stazione in esame, salvo la necessità di calibrare la trasmittanza di cielo sereno. Poiché il modello si basa prevalentemente su dati termici, è stato necessario predisporre un insieme completo di valori di temperatura massima e minima giornaliera sul punto stazione utilizzando Criteria, un sistema modellistico per il bilancio idrico dei suoli agricoli (Marletto, Zinoni, 1996) che, tra le sue varie funzionalità, permette di interpolare i dati mancanti con quelli rilevati nelle stazioni circostanti.

La correzione dei dati misurati è avvenuta su intervalli omogenei all'interno della serie, quindi uno dei problemi consisteva nell'individuare i punti di discontinuità estremi di tali regioni. Come primo indicatore di discontinuità abbiamo utilizzato la radiazione massima annuale, la quale, come mostra la Fig. 2, non presenta fenomeni di ciclicità. Per interpretare le variazioni di questo indicatore tra un anno e l'altro è necessario però disporre anche del conteggio dei dati rilevati. Le variazioni negative della radiazione massima sono infatti talvolta riconducibili all'assenza di misure estive dovute ad avaria dello strumento o della stazione (come ad esempio nel 1995), più che ad altre cause, quali il cambiamento degli strumenti di misura, dell'hardware di stazione o del software di gestione. E' bene comunque disporre della serie giornaliera dei dati al fine di poter attribuire con giusta causa all'uno o all'altro fattore le variazioni della radiazione massima.

Le procedure di correzione e stima della radiazione solare sono state implementate in Excel dato che il citato programma RadEst 3.00 prevede una gestione impegnativa dei dati in file annuali completi. La procedura realizzata ed applicata al caso di S. Pietro Capofiume, verrà utilizzata per produrre un database completo ed omogeneo di dati di radiazione solare globale per tutte le rimanenti stazioni della rete regionale.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato realizzato nell'ambito del Master di Matematica Applicata dell'Università di Bologna durante uno stage trimestrale svoltosi presso l'ARPA Emilia-Romagna. Si ringraziano per il cortese aiuto Andrea Pasquali, tecnico di ARPA-SIM, che ha fornito importanti informazioni relative alla storia della stazione, Gabriele Antolini, collaboratore di ARPA – SIM, che ha riletto criticamente il manoscritto, e i ricercatori dell'Istituto Sperimentale di Colture Industriali Marcello Donatelli e Gianni Bellocchi, che hanno fornito preziose informazioni sull'utilizzo del loro modello.

Bibliografia

Bristow, K., Campbell, G.S., 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. Agric. For. Meteorol. 31, 159-166.

Donatelli, M., Bellocchi, G., 2001. Estimates of daily global solar radiation: new developments in the software RadEst 3.00. Proc. 2nd Int. Symp. Modelling Cropping Syst., 16-18 July, Florence, Italy, 213-214.

Donatelli, M., Bellocchi, G., Fontana, F., 2003. RadEst 3.00: software to estimate daily radiation data from commonly available meteorological variables. Eur. J. Agron., 18, 369-372.

Donatelli, M., Carlini, L., Bellocchi, G., 2004. GSRad, un componente software per la stima della radiazione solare. Riv. Ital. Agromet. 9(1), 24-30.

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1982a. Estimating potential evapotranspiration. Tech. Note, J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 108(3):225-230.

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1982b. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Engrg. in Agric., 1(2):96-99.

Iqbal, M., 1983. An Introduction to Solar Radiation. Academic Press Canada.

Marletto, V., Zinoni, F., 1996. The CRITERIA project: integration of satellite, radar, and traditional agroclimatic data in a GIS-supported water balance modelling environment. In: EUR 18328, Dalezios, N.R. (ed.), 1998. Proc. COST 77, 79, 711 Int. Symp. on Applied Agrometeorology and Agroclimatology, Volos, Grecia, 24-26 aprile 1996, ISBN 92-828-4137-5, 173-178.

Pavan, V., Tomozeiu, R., Selvini, A., Marchesi, S., Marsigli, C., 2003. Controllo di qualità dei dati giornalieri di temperatura minima e massima e di precipitazione. Quaderno Tecnico Arpa-Sim n°15/2003 (accessibile dal sito www.arpa.emr.it/sim).

Rana, G., Introna, M., Rinaldi, M., 2004. Metodologie per il controllo di qualità di dati orari e giornalieri acquisiti da una rete agrometeorologica:applicazioni alla rete lucana SAL. Riv. Ital. Agromet. 9(1), 31-35.

Richardson, C.W., 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. Water Resour. Res., 17, 182-190.

Zinoni, F., Cacciamani, C., De Simone G., Filippini F., Magi, C., Marletto V., Mulazzani, C., Nanni, S., Pasquali, A., Stanzani, R., 1999. Meteo-GIAS: Relazione annuale 1999. Nota interna ARPA-SMR.

VALUTAZIONE DI CAMPO DI ALCUNI MODELLI PREVISIONALI PER LA PERONOSPORA DELLA PATATA

FIELD EVALUATION OF SOME FORECASTING MODELS FOR THE CONTROL OF POTATO LATE BLIGHT

Riccardo Bugiani [1]*, Loredana Antoniacci [1], Luca Lovatti [2]

[1]*: Servizio Fitosanitario – Regione Emilia-Romagna Via Saliceto 81 – 40128 Bologna (Italy)*
[2]*: C.I.S.A. Mario Neri Via Emilia levante, 18 – 40026 Imola*
* *Corresponding author , Tel. +39-51-4159281, fax +39-51-4159277 e-mail: rbugiani@regione.emilia-romagna.it*

Ricevuto 11 febbraio 2005, accettato 1 luglio 2005

Riassunto
Negli anni 2001-2002-2003 e 2004, sono stati valutati in campo, attraverso prove parcellari, tre diversi criteri previsionali per il posizionamento ottimale dei trattamenti antiperonosporici sulla patata. Le prove si sono svolte in condizioni di inoculo naturale. I risultati ottenuti mostrano che sia il modello MISP che il Simphyt sono sufficientemente attendibili nel determinare gli eventi infettivi durante il ciclo colturale della patata. Tuttavia il modello Simphyt è risultato il più efficace nell'anno con una pressione infettiva medio-alta, mentre il modello MISP si è comportato meglio nelle annate a pressione infettiva bassa. Il criterio Fry si è posizionato in posizione intermedia. La valutazione dei modelli in annate a forte pressione infettiva è necessaria per una valutazione finale di questi modelli.

Parole chiave: Patata, peronospora, Phytophthora infestans, modelli previsionali, validazione di campo

Abstract
Field evaluation of different DSS (decision support systems) for correct timing of chemical sprays was carried out over years 2001-2004, and compared with a routine disease control strategy. In 2001and 2002, MISP, Fry and Simphyt II and III models were compared while in 2003 and 2004 only MISP and Simphyt II and III were tested. All the DSS were tested with natural infection. Disease occurred only in 2002. The results however showed, that Simphyt model performance in timing the sprays and controlling the disease was better in years with medium disease pressure. On the contrary, in years unfavourable for blight development MISP proved to be the most effective in saving useless sprays. Further validation in years with high blight pressure would be necessary.

Keywords: *Potato, late blight, Phytophthora infestans, forecasting models, decision support system, field validation*

Introduzione
La peronospora, causata dall'oomicete *Phytopthora infestans*, è senza dubbio una delle più temute avversità della patata. Il fungo sverna come micelio nei tuberi o nei residui colturali infetti rimasti in campo o come oospora, organo durevole dato dalla riproduzione sessuata di due tipi di micelio sessualmente compatibili. In primavera il fungo, passa dai luoghi di svernamento a piantine spontanee e isolate sulle quali si producono inbrunimenti su parte dello stelo e sui piccioli, mentre sulle foglie compaiono macchie irregolari inizialmente decolorate a margine sfumato. Queste, successivamente inbruniscono e in condizioni di alta umidità relativa si ricoprono di una muffa biancastra visibile nella pagina inferiore della foglie e costituita dagli sporangi, organi di diffusione della malattia. Raggiunta la superficie vegetale di un ospite suscettibile, basta la presenza di un film liquido su questa perché questi germinino e infettino la pianta (fig.1). In condizioni ambientali fresche e umide il patogeno è in grado di produrre diversi cicli secondari portando nel giro di una settimana a morte la pianta. I fattori climatici che concorrono allo sviluppo della malattia sono stati ampiamente studiati in tutto il mondo. Il range termico di sviluppo del fungo va da 7°C a 28°C, mentre la temperatura ottimale è di circa 18-22°C. Generalmente le infezioni avvengono con almeno 10-12 ore di bagnatura e temperatura superiore a 10°C. A partire dall'infezione, i sintomi sulla pianta compaiono da 4 a 10 giorni in funzione della temperatura. L'avvento ormai decennale dell'informatica ha dato la possibilità di implementare modelli previsionali, strumenti in grado di fornire indicazioni circa il rischio fitosanitario delle colture e quindi di aiutare il tecnico e l'agricoltore nella propria attività. In Emilia Romagna è stato sviluppato, e già da diversi anni utilizzato per determinare il rischio di comparsa della peronospora sia su patata che pomodoro, il modello previsionale denominato I.P.I. (Infection Potential Index) (Bugiani *et al.*, 1993). Sulla base di dati meteorologici giornalieri, il modello calcola un indice di rischio giornaliero cumulato partendo dall'emergenza della patata fino al raggiungimento di un valore soglia per l'esecuzione del primo intervento (Bugiani *et al*., 1997, Bugiani *et al*., 1998). Il modello I.P.I. deve quindi considerarsi a "prognosi negativa", in quanto non indica con precisione la comparsa della malattia, ma individua un periodo di tempo in cui è improbabile che essa si manifesti in cam-

Fig. 1 - sintomi iniziali di peronospora su foglia di patata.
Fig. 1 - *Symptoms of late blight on potato leaf*

po, rendendo di conseguenza inutili eventuali trattamenti. Questo modello, quindi, fornisce indicazioni sull' esecuzione del primo trattamento, ma non dà alcuna informazione circa i successivi eventi infettivi.
Con il presente lavoro si intendono valutare alcuni criteri previsionali che permettano, dopo il superamento della soglia definita dall'I.P.I., di posizionare correttamente i trattamenti successivi e quindi di gestire il controllo fitosanitario della peronospora della patata per tutta la stagione vegetativa. I modelli considerati sono stati: Fry (Fry *et al*., 1983), Simphyt II a III (Kleinhenz *et al*., 1999, Jorg *et al*., 1999, Gutsche *et al*., 1998) e il MISP (Cao *et al*., 1997; Ruckstuhl, e Forrer, 1998; Bugiani *et al*., 1999), sviluppati rispettivamente in USA, Germania e Svizzera.

Materiali e metodi

A partire dal 2001 sono state realizzate delle verifiche di campo per valutare quale di questi modelli previsionali permettesse di ottenere un buon controllo della malattia e di ridurre nel contempo, il numero dei trattamenti rispetto ad una strategia di difesa a calendario. Nel 2001 a 2002 sono stati presi in esame i modelli MISP, Fry e Simphyt, mentre nel 2003 solamente MISP e Simphyt. I campi sperimentali erano localizzati vicino a Bologna, in un'area di produzione tipica della patata; sono state scelte cultivar molto suscettibili a peronospora, quali Agata e Primura, e adottato un disegno sperimentale a blocchi randomizzati con 4 repliche. Ogni parcella misurava 27 m^2 (6 file x 5 m.). Tutti i modelli sono stati valutati su infezioni naturali. Il primo trattamento veniva realizzato al raggiungimento della soglia di rischio del modello I.P.I, mentre quelli successivi erano eseguiti in base alle indicazioni dei diversi criteri: Fry, MISP, e Simphyt.
I diversi modelli venivano confrontati con una strategia di difesa a calendario, che prevedeva interventi settimanali. In tutte le tesi, compreso quella dove si applicava la strategia a calendario, al superamento della soglia I.P.I. si è intervenuti con Metalaxyl+Cu o Famoxadone+ Cymoxanil, mentre per i trattamenti successivi si è impiegato Cymoxanil+Cu. (tab. 1) Per conoscere l'andamento degli eventi infettivi nel campo prova una tesi non è mai stata

Tab. 1 – strategie di intervento, prodotti fungicidi, date di esecuzione dei trattamenti e note sulla presenza di peronospora.
Tab. 1 – Disease strategies, fungicides, spray timing and notes on disease occurrence.

Strategie	Formulati	Data di intervento	Note sulla malattia
2001			
Testimone	--	--	Assente
Calendario	Ridomil R	09/05	
	Curzate R	25/05, 31/05, 08/06, 9/06	
MISP	Curzate R	25/05	
	Curzate R	08/06	
Simphyt	Curzate R	25/05, 08/06	
Fry	Curzate R	25/05, 31/05, 08/06	
2002			
Testimone	--	--	12.5% di area fogliare colpita al 17/6
Calendario	Equation pro	05/05	
	Ridomil R	15/05, 31/05	
	Curzate R	07/06	
	Equation pro	18/06	
MISP	Equation pro	05/06	
Simphyt	Equation pro	05/06, 18/06	
	Ridomil R	31/06	
Fry	Equation pro	05/05, 18/06	
	Ridomil R	15/05, 31/05	
2003			
Testimone	--	--	Assente
Calendario	Equation pro	13/05, 22/05	
	Curzate R	30/05, 20/06	
	Ridomil R	06/06	
MISP	Equation pro	23/05	
Simphyt	Equation pro	13/05	
	Ridomil R	06/06	
2004			
Testimone	--	--	Assente
Calendario	Equation Pro	18/05	
	Curzate R	28/05	
	Ridomil R	07/06, 18/06	
	Curzate R	24/06	
	Dithane	01/07	
MISP	Curzate R	28/05	
	Ridomil R	11/06	
Simphyt	Curzate R	28/05	
	Ridomil R	07/06	
	Curzate R	24/06	

Legenda:
Ridomil R (Metalaxyl+Cu); Curzate R (Cymoxanil+Cu); Equation Pro (Famoxadone+Cymoxanil); Dithane (Mancozeb);

trattata. Dal momento della comparsa della malattia sono stati effettuati quattro rilievi valutando la % di area fogliare colpita. Alla raccolta sono stati eseguiti rilievi produttivi e patometrici sui tuberi. I risultati sono stati elaborati tramite l'analisi della varianza, trasformando preliminarmente i valori percentuali in arcoseno. Per la separazione delle medie è stato utilizzato il test di Student-Neuman-Keuls.
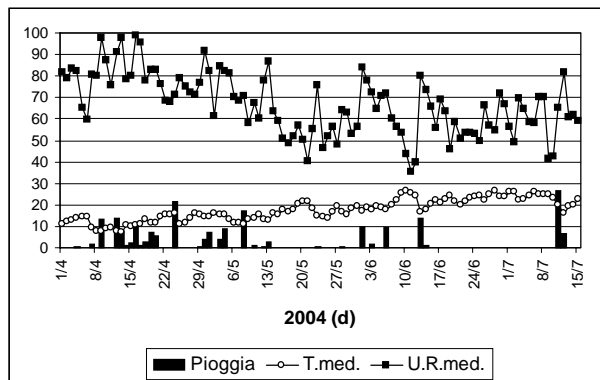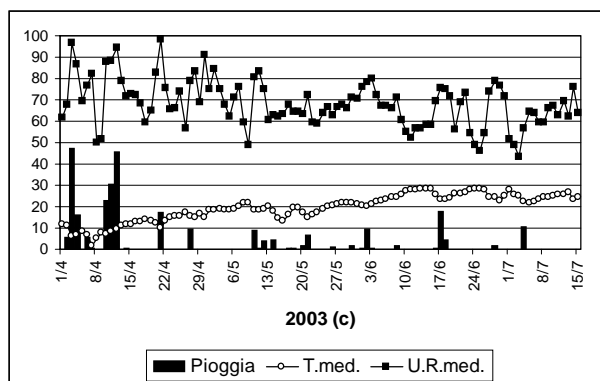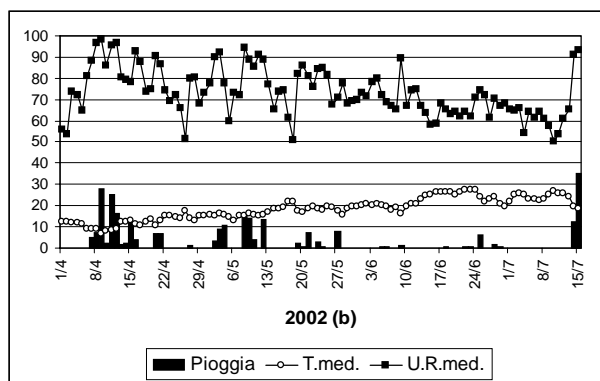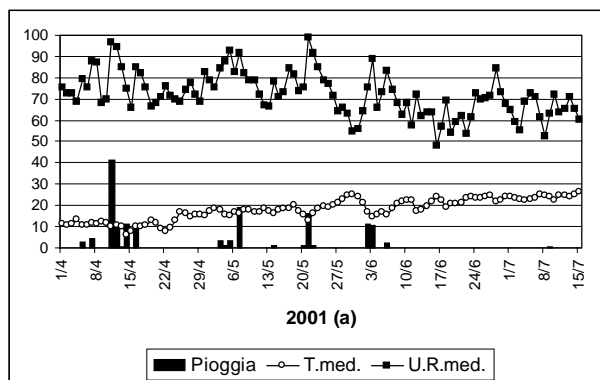
Fig. 2 - Andamento climatico delle località oggetto di sperimentazione negli anni 2001 (a), 2002 (b), 2003 (c) and 2004 (d).

Fig. 2 - *Climate recorded in the experimental fields in 2001 (a), 2002 (b), 2003 (c) and 2004 (d).*

Tab.2 - Risultati della prova eseguita nel 2002.
Tab.2 - *Results of field trial carried out in 2002*

Strategia	N° di trattamenti	% area fogliare colpita				Resa (t/ha)
		22/5	5/6	14/6	17/6	20/7
Testimone	0	1,0 b *	7,7 b	9,0 c	12,5 c	43,6 °
Calendario	5	0,0 a	3,0 a	4,7 a	6,5 a	49,2
IPI+MISP	1	0,0 a	3,7 a	6,2 b	8,5 b	43,8
IPI+FRY	4	0,0 a	3,0 a	5,0 ab	6,7 ab	46,1
IPI+Simphyt	3	0,0 a	3,0 a	4,5 a	6,5 a	48,2

* medie seguite da lettere diverse sono significativamente differenti al 95% di probabilità
° le rese non sono risultate statisticamente significative

Risultati

Il 2001 è stato un anno a bassa pressione della malattia. Infatti i periodi a rischio di infezione peronosporica sono stati due, dal 3 all'8 /5 e il 21-22/5. Successivamente, il fattore limitante, è stato la quasi totale assenza di pioggia dai primi giorni di giugno fino alla raccolta (fig. 2). La malattia è comparsa nella provincia di Bologna il 14/5 a seguito delle piogge infettanti correttamente segnalate dal modello I.P.I., ma nell'appezzamento oggetto della prova la peronospora non è comparsa.
I criteri MISP e Simphyt hanno fatto eseguire 2 trattamenti, il criterio Fry 3, mentre la strategia a calendario ha previsto l'esecuzione di 5 interventi. Alla raccolta la produzione di patate non è risultata statisticamente differente nelle diverse tesi.
Nel 2002 la pressione della malattia è stata medio-alta in maggio, mentre per il resto della stagione vegetativa si è portata a livelli bassi o molto bassi. I primi sintomi si sono osservati il 22/5 nelle parcelle non trattate; successivamente gli attacchi di peronospora si sono evidenziati in tutte le tesi, ma con una gravità significativamente maggiore in quella dove si interveniva applicando il criterio MISP (tab.2). Dal punto di vista produttivo però la malattia non ha causato alcuna perdita significativa (tab.2). Il criterio MISP ha consigliato 1 intervento, il Simphyt 3 , il Fry 4 mentre con la strategia a calendario ne sono stati eseguiti 5.
Nel 2003 le precipitazioni rarefatte e le temperature elevate, unite a bassa umidità relativa, per un periodo prolungato di tempo, non hanno favorito lo sviluppo di. *P. infestans* che non è comparsa in nessuna parte della provincia. Il criterio MISP ha fatto eseguire 1 intervento, il Simphyt 2 mentre la strategia a calendario ne ha previsti 5.
La malattia nel 2004 è comparsa in alcune aree della provincia intorno al 18/5, inseguito a piogge a carattere locale cadute il 5/5. Successivamente, per tutto il mese di giugno non si sono verificati eventi piovosi. Il modello I.P.I. ha segnalato il superamento della soglia il 22/5; nessun sintomo, tuttavia, è stato riscontrato sulla coltura fino alla raccolta. La tesi trattata a calendario ha visto l'esecuzione di 6 interventi, iniziando il 18/5. Il criterio MISP, anche in questo caso, ha consigliato il minor numero di trattamenti, 2, mentre il Simphyt ne ha previsti 3.

Conclusioni

Come la maggior parte dei patogeni fungini, la comparsa e la diffusione della peronospora è strettamente legata alle condizioni climatiche. Proprio la sua erraticità e imprevedibilità la rende particolarmente pericolosa e spesso induce gli agricoltori ad eseguire più trattamenti fungicidi di quelli strettamente necessari. I modelli previsionali sarebbero quindi di notevole aiuto per posizionare i trattamenti solamente nei periodi a rischio di infezione. I risultati ottenuti durante i quattro anni di sperimentazione mostrano che sia il modello MISP che il Simphyt sono più attendibili del modello Fry nel determinare gli eventi infettivi durante il ciclo colturale della patata. In particolare, il modello Simphyt è stato il più efficace negli anni con una pressione della malattia medio-alta, riducendo il numero degli interventi chimici pur mantenendo un controllo della malattia simile a quello ottenuto con i trattamenti a calendario. Il modello MISP sembra fornire migliori risultati in annate con condizioni non favorevoli alla peronospora, riducendo al minimo il numero di applicazioni chimiche. Il modello Fry si pone in posizione intermedia; esso risulta mediamente cautelativo negli anni a medio rischio, ma fa spesso eseguire interventi inutili. Complessivamente, la malattia è comparsa solamente un anno sui quattro oggetto di sperimentazione. I modelli previsionali sono stati in grado di indicare nel corso della stagione i pochi momenti a maggior rischio epidemico nel corso dei quali era necessario intervenire chimicamente. Ciò ha portato infatti a salvaguardare la produzione con il minimo numero di trattamenti possibile. Tuttavia, per arrivare ad una valutazione definitiva di questi modelli si rende necessario proseguire la sperimentazione, specialmente in annate ad alto rischio infettivo.

Bibliografia

Bugiani R., Cavanni P., Ponti I., 1993. An advisory service for the occurrence of P.infestans on tomato in Emilia-Romagna region. Bulletin OEPP/EPPO Bulletin, 23, 607-613.

Bugiani R., Govoni P., Cobelli L., 1997. Comparison of different prediction criteria for the occurrence of potato late blight in Northern Italy. In: E.Bouma and H.Schepers (eds.), PAV –Special Report no1., January 1997, 69-78.

Bugiani R., Govoni P., Cobelli L., 1998. First large scale application of IPI model for potato late blight prediction in the Po Valley. In: E.Bouma and H.Schepers (eds.), PAV –Special Report no3., January 1998, 188-199.

Bugiani R., Govoni P., Cobelli L., 1999. Possibility of a combined use of IPI and MISP forecasting models for late blight warnings. In: E.Bouma and H.Schepers (eds.), PAV –Special Report no5., January 1999, 258-270.

Cao K.Q., Ruckstuhl M., Forrer, H.R., 1997. Crucial weather conditions for Phytophthora infestans: a reliable tool for improved control of potato late blight? In: E.Bouma and H.Schepers (eds.), PAV –Special Report no1., January 1997, 85-90.

Fry E.W., Apple A.E., Bruhn J.A., 1983. Evaluation of potato late blight forecasts modified to incorporate host resistance and fungicide weathering. Phytopathology, 73, 1054-1059

Gutsche V., 1998. Usage of model Simphyt in frame of project PASO in Germany from 1994 to 1997. In: E.Bouma and H.Schepers (eds.), PAV –Special Report no3., January 1998, 104-110.

Jörg E., Kleinhenz B., 1999b. Proposal for the validation of late blight DSS in field trials. In: E.Bouma and H.Schepers (eds.), PAV –Special Report no5., January 1999, 27-29.

Kleinhenz B., Jörg E., 1999. Validation of Simphyt I/II – a decision support system for late blight control in Germany. In: E.Bouma and H.Schepers (eds.), PAV –Special Report no5., January 1999, 115-128.

Ruckstuhl M., Forrer H.R., 1998. Main infection and sporulation periods (MISP): towards its use in an event-based DSS to control potato late blight. In: E.Bouma and H.Schepers (eds.), PAV –Special Report no3., January 1998, 67-76.

WARM: A SCIENTIFIC GROUP ON RICE MODELLING

WARM: UN GRUPPO DI STUDIO SULLA MODELLISTICA DEL RISO

Roberto Confalonieri[1]*, Marco Acutis[2], Marcello Donatelli[3], Gianni Bellocchi[3], Luigi Mariani[2], Mirco Boschetti[4], Daniela Stroppiana[4], Stefano Bocchi[2], Francesco Vidotto[5], Dario Sacco[5], Carlo Grignani[5], Aldo Ferrero[5], Giampiero Genovese[1]

[1]*: Institute for the Protection and Security of the Citizen, Joint Research Centre of the European Commission, AGRIFISH Unit, MARS-STAT Sector, TP 268 – 21020 Ispra (VA), Italy.*

[2]: *Dipartimento di Produzione Vegetale, Sezione di Agronomia, Università degli Studi di Milano, Via Celoria 2, 20133 Milano, Italy.*

[3]*: Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura - Istituto Sperimentale per le Colture Industriali, Via di Corticella 133, 40128 Bologna, Italy.*

[4]: *IREA CNR, Institute for Electromagnetic Sensing of the Environment, Via Bassini 15, 20133 Milano, Italy*.

[5]: *Dipartimento di Agronomia, Selvicoltura e Gestione del territorio, Università di Torino, Via L. da Vinci 44, 10095 Grugliasco (TO), Italy.*

**: Corresponding author*, *Tel. +39-0332-789872, E-mail: roberto.confalonieri@jrc.it, Fax: +39-0332-789029*

Abstract
This paper is an open letter aiming at inviting all researchers and technicians working on rice and/or on modelling aspects that can be related to rice to participate to a scientific exchange group.
The WARM (Water Accounting Rice Model) model is currently the result of an unofficial cooperation among researchers working at the Joint Research Centre of the European Commission (IPSC, Agrifish Unit – MARS STAT Section), at the Department of Crop Science of the University of Milan, at the Istituto Sperimentale per le Colture Industriali (Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura; CRA – ISCI) and at the Institute for Electromagnetic Sensing of the Environment (IREA-CNR) of Milan. The aim of this scientific exchange is the development of a simulation model for flooded rice able to manage all the main aspects influencing crop production (e.g. crop behaviour, pests, weeds). WARM is an original model with several innovative features aiming at reproducing the peculiar conditions of mid latitudes paddy fields (e.g. floodwater effect on vertical thermal profile). The WARM software has some interesting technical features which can support the user or the developer in the calibration and testing activities. The most important ones are the tools for the automatic calibration (based on the simplex method) and for the statistical evaluation of model performances.
The results obtained from this collaboration encouraged us to enlarge the group through this invitation to all those people who are interested in testing the model, further improving existing modules and developing new ones, and/or sharing data. We believe that sharing knowledge coming from people working on different aspects of rice research is the only way to develop a complete and powerful rice model.

Keywords: Oryza sativa L., crop model, simulation, simplex, modularity

Riassunto
Questa nota dovrebbe essere letta come una open letter con lo scopo di invitare tutti i ricercatori e i tecnici che si occupano di riso e/o di aspetti di modellistica applicabili al riso a partecipare ad una nuova iniziativa di interscambio scientifico.
Il modello WARM (Water Accounting Rice Model) è il risultato di una collaborazione non ufficiale tra ricercatori del Centro Comune di Ricerca della Commissione Europea (IPSC, Agrifish Unit – MARS STAT Section), del Dipartimento di Produzione Vegetale dell'Università degli Studi di Milano, dell'Istituto Sperimentale per le Colture Industriali (Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura; CRA – ISCI), del IREA-CNR di Milano. Lo scopo del gruppo è lo sviluppo di un modello di simulazione per il riso in sommersione che consideri potenzialmente tutti gli aspetti con influenze significative sulle produzioni (e.g. crescita della coltura, parassiti, malerbe). WARM è un modello originale con diverse caratteristiche innovative per la simulazione delle particolari condizioni che caratterizzano le risaie sommerse alle medie latitudini (e.g. effetto dell'acqua di sommersione sul profilo termico verticale). Il software WARM ha alcune caratteristiche interessanti per supportare l'utente o lo sviluppatore nelle attività di calibrazione e test. Le più importanti sono le procedure per la calibrazione automatica (basata sul metodo del simplesso) e per la valutazione statistica delle performance del modello.
I risultati ottenuti da questa collaborazione ci hanno incoraggiato ad allargare il gruppo invitando tutte le persone interessate allo sviluppo di moduli, alle attività di test e/o a mettere a disposizione banche dati. Riteniamo che l'unione delle conoscenze di persone che lavorano su aspetti diversi della ricerca sul riso sia l'unica via per sviluppare un modello di riso realmente utile e completo.

Parole chiave: *Oryza sativa L., modello colturale, simulazione, simplesso, modularità*

Introduction

This paper is, in the Authors intention, an open letter addressed to the European community of agronomists, physiologists, soil physicians, pathologists, weed experts, chemistries, agrometeorologists, modelers and technicians providing support to farmers and politicians interested in rice crop.
Although it may appear as a paper mainly oriented to modelling we want to underline that we do not consider modelling a stand – alone discipline. In fact, we feel surprised by the suspect models are often looked at whereas they are simply the result of the inductive process, which is the basis of the scientific method. Indeed the activity of collecting data aims exactly at the definition of general laws, that are models (Confalonieri, 2003).
We gratefully acknowledge the Editor of this Journal for giving us the opportunity of using this channel to reach all the above mentioned people.
The quest for balance in crop modelling
Crop models users are often unsatisfied by the models currently available. Monteith (1996), in a precious and illuminated paper entitled The quest for balance in crop modelling, indirectly advised the modelers community about the risk involved in crop modelling. By considering simply the different approaches used for the simulation of biomass accumulation, it is possible to notice that some models are very detailed in the description of the processes related to photosynthesis. The Wageningen models (van Ittersum *et al*., 2003) are clear examples of this approach. In fact they are particularly suitable to focus the attention on the gaps in the comprehension of the plant physiology, in providing help in interpreting data collected in field experiments (Monteith, 1996), in studying processes at the level of plant components (Confalonieri and Bechini, 2004) and test hypotheses. However, their complexity increases the complexity of the calibration process (Stöckle, 1992). Hence, the need of an excessive number of crop parameters to be measured to define the crop behavior often determines either an excessively empiric calibration process or the abandonment of the idea of using them.
Analogue considerations are provided by Mahmood (1998) in relation to the CERES-family models (Uehara and Tsuji, 1993). The situation gets rapidly worse for large scale simulations (Confalonieri and Bocchi, 2005).
On the other hand, other widely used models (e.g. CropSyst; Stöckle *et al*., 2003) are increasingly considered too empiric for an effective reproduction of crop behavior and they tend to give excessive importance to the calibration process because of the use of many empiric (and therefore unmeasurable) parameters.
Moreover, the theoretical support to simulation models has not been further developed in the last 20 years. Modelers reached interesting results in crop growth and development simulation and they did not invest enough on the simulation of what is strictly related to crops: weeds, pests, interactions with uncommon environmental factors, etc. The result is that most of the models are unbalanced: they can not simulate the different aspects of the system and users that need to provide information about crops status, yield forecasts or to provide early warning for some injuries can not be satisfied by them.
For these reasons, we are pushing scientific exchange to try to provide solutions either to the still open issues in rice modelling or to those issue maybe already solved but not enough diffused within the scientific community (e.g. influence of floodwater on temperatures, blast). The basic idea is that experts from all the rice – related disciplines (crop physiology, pathology, weeds management, pests, soil physics, environmental impact of agricultural practices, etc.) should develop and make available routines for the simulation of what they are expert in. We think that this is the only way to develop a really balanced model able to cover all the aspects related to rice science.
The group is open also to researchers working in fields that are not apparently directly related to rice crop science but who can contribute to those aspects which are linkable to a crop simulator. For example, three research groups are currently contributing respectively to the statistical aspects related to model evaluation, to forcing/steering the model using remotely sensed data and to develop the automatic calibration. This is very important in order to develop a powerful environment for testing hypotheses and theories specifically related to rice.
Last but not least, the developed simulation model would be not only a software for carrying out simulations but also a concrete, continuously updated and available-for-everybody state of the art in rice research (especially in Italy), giving hospitality to the different fields of rice crop science.
Therefore, the aim of this “open letter” is to show the philosophy, the general framework and the main features of the model WARM (Water Accounting Rice Model; figure 1) and to invite all the interested people to participate to this project and to share their precious knowledge. Remember that we all belong (although with different roles) to a scientific community.

The developing group

The scientific groups currently involved in the development of WARM are:

- the MARS – STAT Research Action of the Institute for the Protection and Security of the Citizen of the Joint Research Centre (JRC) of the European Commission;
- the Department of Crop Science (Di.Pro.Ve.; Section of Agronomy) of the University of Milan;
- the Agricultural Research Council Research Institute for Industrial Crops (CRA-ISCI);
- the Institute for Electromagnetic Sensing of the Environment (IREA) of the Italian Council of Research (CNR);
- the Department of Agronomy, Selviculture and Terrain Management of the University of Turin.

This initiative is supported by the Associazione Italiana di Agrometeorologia (Italian Society of Agrometeorology).
The scientific group is open to everybody who is working on any aspect of rice research or on modelling aspects useful for the improvement of WARM.

Simulation model

Algorithms and developing sub-teams

Framework and general aspects
The coordination of the group is currently managed by MARS STAT Research Action of the JRC.
The model is developed in Visual Basic. The modular structure and the object – oriented programming allows the development of class modules for each studied aspect and its test in an easy Microsoft Excel pre – defined environment. The classes are successively imported in a Visual Basic Project that is compiled as freely – deliverable executable. With respect to other more rigid although more powerful frameworks, this choice offers the advantage of making the development process easier and more flexible and allows the participation of researchers with a medium level of programming experience, without the need of professional programmers. Moreover, those researchers without programming skills can provide the documentation of new algorithms to the coordinator who will produce the related Visual Basic codes. This is feasible because of the relative simplicity of the application field (one crop, one simulation year, no interactions among different farming components are considered).
Some modelling choices (e.g. monolayer canopy, net photosynthesis) are due to the quest for a high level of robustness and an easiness of calibration.

Crop growth and development
Crop growth and development procedures are developed by the JRC.
Crop development is based on the thermal time accumulated between a base temperature and a cutoff temperature; optionally the obtained value can be corrected with a factor accounting for photoperiod.
For the simulation of the processes related to AGB accumulation, partitioning and LAI estimation, the GAIA model (Confalonieri, 2005) has been used. The net photosynthesis is simulated using a simple radiation use efficiency (RUE) approach, with the
RUE ($g_{above\ ground\ dry\ matter}$ $(MJ_{photosynthetically\ active\ radiation})^{-1}$) varying according to development, drought and cold injuries. A beta – distribution function is used to account for temperature limitations to photosynthesis (Yan and Hunt, 1999). Presently, no water limitations to growth are considered: as it is the model is suitable for the Italian widespread rice growing conditions. Yet, a module for water – limited production is under development.
Aboveground biomass (AGB) accumulated each day is partitioned to leaves, stems and kernels according to the following rules.
Leaves. AGB is partitioned from emergence to flowering using a parabolic function assuming the maximum value at emergence (input parameter) and zero at flowering. The use of a function drawn by a single input parameter (easily measurable, relatively specific and constant for varieties belonging to the same group) instead of a series of partitioning coefficients function of different developing stages (this approach is used in the Wageningen models derived by SUCROS (van Keulen *et al*., 1982)) enhances the robustness of the partitioning process by limiting the degrees of freedom in the calibration. This is important because errors in AGB partitioning to leaves today cause errors in Leaf Area Index (LAI) estimation and therefore in AGB accumulation tomorrow. We consider this a satisfactory compromise between the Wageningen approach and others, excessively empiric and insufficiently linked to reality (e.g. the CropSyst approach, based on an empiric relation among a constant Specific Leaf Area (SLA), AGB and an empiric coefficient).
Kernels. AGB partitioning to kernels start at the beginning of heading and it is assumed as maximum (all the daily accumulated AGB is partitioned to kernels) at the beginning of the ripening phase. Three different shapes of the function between heading and ripening represent the difference among high –, medium – and low – yielding varieties.

Fig. 1 – WARM: the splash form
***Fig. 1** – WARM: schermata di presentazione.*
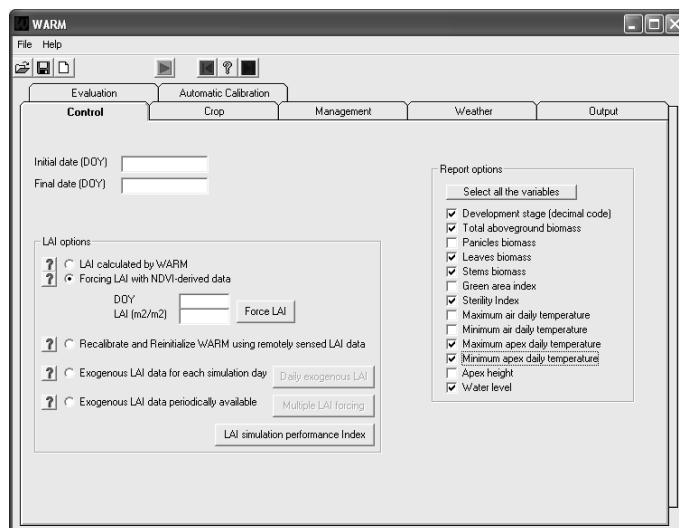
Fig. 2 – WARM: simulation options
***Fig. 2** – WARM: opzioni di simulazione*

Fig. 3 – WARM: crop parameters
***Fig. 3** – WARM: parametri colturali*
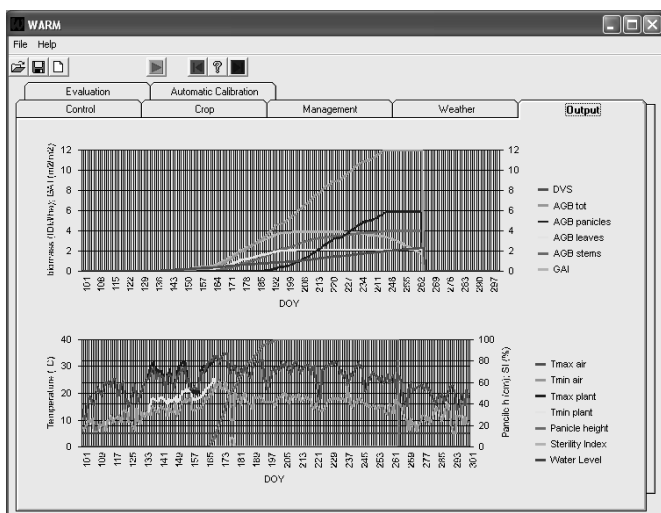
Fig. 4 – WARM: output visualization
***Fig. 4** – WARM: visualizzazione degli output*

Stems. Stems biomass is simply derived by subtracting kernels and leaves biomasses to AGB.
Leaf area index is computed multiplying the leaves biomass for a specific leaf area (SLA) variable according to the development stage and to water availability.
The height of the meristhematic apex is simulated to relate the part of the plants sensible to temperature to the real conditions along the vertical thermal profile.

Spikelet sterility induced by cold shocks and related aspects
These routines are developed at the JRC and at the Di.Pro.Ve.
WARM includes routines for the simulation of the spikelet sterility induced by cold shocks during the panicle initiation – heading period (Williams and Angus, 1994; Confalonieri *et al*., 2004). The calculated sterility index until heading is used to decrease the quantity of biomass partitioned to kernels and to reduce the assimilation efficiency through a reduction of the RUE.
Micrometeorology
This aspect, fundamental in temperate paddy fields, is developed by the Di.Pro.Ve. and by the JRC.
The modules developed by Confalonieri *et al*. (2005) for the simulation of the effect of flooding water on the vertical thermal profile are currently included in the model. An evolution of the mechanistic module is under development with the objective of relating the heat storage capability of water to different floodwater heights.

Water balance
The water balance module is developed at the Di.Pro.Ve. with the aim of simulating water infiltration and water level under flooded conditions. This module is based on the assumption of a Darcian-type gravity flow in unsaturated soil, for water content exceeding field capacity (as in many other models; e.g. ANSWERS2000; Bouraoui *et al*., 1997). Consequently, it is based on the followings: (i) the water flux in soil is only in the downward direction; (ii) the flux is 0 when the soil water content is equal or below the field capacity; (iii) the water travel time is proportional to the saturated hydraulic conductivity and the water content is in the range between saturation and field capacity; (iv) saturated conductivity is a limiting factor for infiltration. This standard approach is integrated with the computation of the floodwater level, derived from the input and output water flows, provided by the user, and the infiltration rates. The time step for hydrological processes is 1 minute.

Blast disease
A simple blast module, developed at the JRC, is currently under test. It computes a vulnerability index according to the meteorological conditions (temperature, humidity and dew) and the different varieties susceptibility.

Automatic calibration
This section, developed at the Di.Pro.Ve., implements an easy and automated process to improve the fitting of the measured data through the calibration of few (maximum 4 contemporaneously) parameters. For each parameter, a domain must be specified by the user. The simplex algorithm (Nelder and Mead, 1965) is adopted for the optimization. The objective function may be chosen among the indices proposed in IRENE DLL (Fila *et al*., 2003), including also fuzzy aggregation of more simple indicators(Bellocchi *et al*., 2002). Although this algorithm does not offer a theoretical background about its capacity of minimization, it is one of the best algorithms for obtaining a rapid reduction of the objective function without requiring the computation of derivatives (that is very difficult with models like WARM).

Forcing WARM with remote – sensed data
This section is developed by the JRC and by the IREA-CNR.
A critical topic in crop modelling is the frequent inconsistency between the availability of detailed input data and the required accuracy of models results. Often the re-

quired input information on crop management, weather data, soil properties etc. cannot be provided with adequate detail especially when passing from plot/field scale to farm/regional scale.
Moreover, models have been constrained by the lack of an efficient means of incorporating spatially distributed input variables. Remote sensing can be a source of detailed and spatially distributed data to be used as inputs for physiological models thus overcoming some of these limitations. WARM currently includes three options for the use of remotely-sensed LAI data:

- up-dating of the state variable;
- direct use of a driving variable;
- re-initialization of the model.

The first is particularly useful for real –time simulations such as yield forecast. The simulation is carried on with meteorological data available every n days. When the remotely sensed LAI value is available, it is substituted to the simulated one. According to the current value of SLA and to the value of the partitioning functions, it is used to derive first the leaves biomass and then the other above-ground biomass components. LAI and AGB values derived from remote sensing are plotted on the chart showing the trend of the state variables with the correspondent AGB. If they are considered reliable by the user, the model is reset using the “observed” data.
The second option automatically substitutes daily or periodic remotely sensed data to the LAI value simulated by the model.
The third option, under development, aims at exploiting remotely sensed data to recalibrate and reinitialize the model.

Statistical evaluation of model performances
CRA-ISCI and Di.Pro.Ve. are developing the routines involved with the statistical evaluation of model performances. IRENE DLL (Fila *et al*., 2003) is currently implemented but a more powerful fuzzy procedure for the aggregation of the fitting indices is under development.

The executable
The executable presents a very user-friendly interface, it gives the possibility to import excel file, it is provided with a simple but quite efficacy guide and it offers routines for:

- the automatic computation of the most important indices of agreement;
- the production of a calibration history (allowing the user to recover the combination of parameters corresponding to the combination with particular values of the indices);
- visualizing on diagrams the correspondence of measured and simulated data (a chart with time on the X-axis and a chart with measured versus simulated data);
- the automatic calibration (simplex method).

The user’s interface is actually organized in 7 sections. The first one (Control section – Figure 2) allows the user to define starting and ending dates for the simulation, to choose among four options for LAI (simulated, remote sensed, etc.) and to select the output variables to be saved as a report excel file. The second section (Crop – Figure 3) includes all the information necessary to describe the crop. The section Management actually includes information only about the sowing date, the latitude and the irrigation strategy (flooded or not). The fourth section (Weather) allows the import of daily weather data. The section Output visualizes the model output (Figure 4) on two charts: one for the variables related to production and the other one for the variables related to weather and to simulated stresses. The fifth section (Evaluation – Figure 5) allows the import of measured data and the comparison with simulated ones. Three modalities for model evaluation are implemented: (i) a chart with measured and observed variables as a function of time, (ii) a chart showing measured versus simulated values with automatic computation of the regression equation and its significance and (iii) the computation of statistical indices particularly suitable for model evaluation and the values of synthetic indicators resulting from the aggregation of the indices using fuzzy rules. The last section (Automatic calibration – figure 6) allows the user to introduce those few information necessary to start the automatic calibration procedure based on the simplex method for the generation of the combination of parameters.
The executable version has been codified to be very user friendly, both when you have to carry out the simulation and when you have to evaluate simulation results. We hope that these features encourage the distribution of WARM to many users in order to have a feedback for model improvement.

The excel version
The excel version of WARM is the testing bench of the developed theories. We think that, although Excel Visual Basic for Application is not a powerful environment, it very easy to test routines and to play with numbers and class modules in the simple environment of a spreadsheet. No particular programming skills are required.

The CGMS version
The CGMS (Crop Growth Monitoring System) version of WARM is, practically, a link between WARM and the MARS (Monitoring Agriculture with Remote sensing) database.
The compatibility of the three versions of WARM is ensured by using the same input and output files (e.g. when you save a crop file in the executable user interface, an excel file identical to those used for the excel version will be produced and vice versa; this file can be opened from the interface).

Perspectives

Weeds and pests
Weeds and pests are two of the main factor influencing rice productions, especially if we speak about alternative management practices. Regardless to the increasing importance of low impact management (Bocchi *et al*., 2003), they still are not sufficiently considered by crop modellers. The introduction of reliable routines to fill this gap in rice simulation is one of the major goals of WARM.
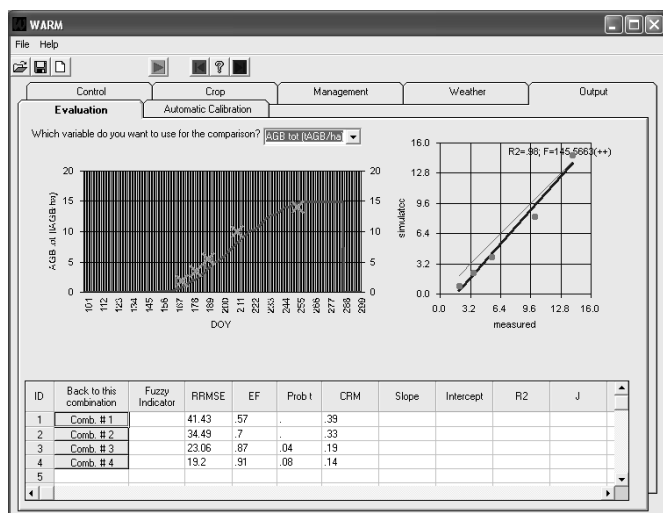
Fig. 5 – WARM: automatic evaluation of model performances (comparison with measured data)
Fig. 5 *– . WARM: valutazione automatica delle performance del modello (confronto con dati misurati)*
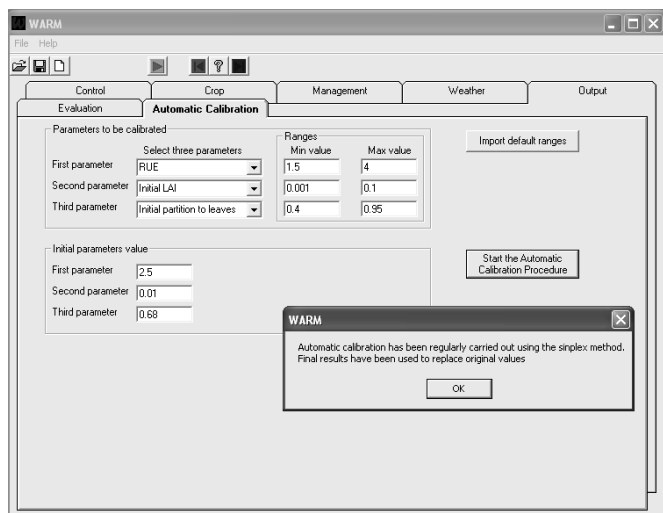
Fig. 6 – WARM: tool for the automatic calibration
Fig. 6 *– WARM: tool per la calibrazione automatica*

For example, a model of weed population dynamics has been developed in NW Italy for weedy rice, one of the most troublesome weeds infesting rice worldwide. The model uses input variables and parameters controlling weedy rice population growth that are related to traits of the weed population itself (seed bank size, seed germination and emergence, etc.), to the agronomic conditions (soil tillage, in particular), and to the practices applied pre-planting for weed control (Vidotto *et al*., 2001; Vidotto and Ferrero, 2005).

Nitrogen balance

Routines for the simulation of the effects of floodwater on oxygen availability, temperature in the first soil layers, rice peculiar parenchyma (oxygen in the rhizosphere), etc. and therefore on nitrogen balance are going to be developed. In fact, mechanistic and tested routines for accounting the peculiarities of submerged soils in this sector of rice simulation are not available in the literature.

Territorial analysis

The WARM approach is at the moment referred to micro-scale (single rice fields); a natural evolution could be represented by a specific agrometeorological and hydrological studies in order to (i) evaluate the effects of rice districts on static and dynamic features of climate (e.g. climatic effects on temperature, relative humidity, rainfall) (Ambrosetti *et al*., 2000); (ii) evaluate the influences on regional water balances also in the light of the climate inter-annual variability; (iii) evaluate the interaction of a peculiar use of soil with different weather types affecting a given territory (Goodes *et al*., 1997; Mariani *et al*., 1998).

This approach could represent a significant contribution to the quantitative evaluation of rice effects on fluxes of energy and cycles of elements at different scales and can contribute to evaluate the effects of presence of rice fields in areas with increasing human presence and activities (Mariani and Sovrano, 2001; Mariani, 2004).

Re-calibration and Re-initialization procedure using remote sensed data

Remotely sensed data will be used to improve model performance by exploiting their ability in describing spatial and temporal variability of the plant conditions. Satellite data can be used directly in vegetation monitoring and crop yield estimation (Boschetti *et al*., 2004; Gaouna *et al*., 2003) or alternatively RS data ca be exploited to derive biophysical parameter to be ingested by crop models. One of the most important parameters is the Leaf Area Index (LAI) that can be retrieved by empirical regression analysis or by using irradiative transfer models (Boschetti *et al*., 2002).

The assimilation procedure is based on the minimization of the difference between the state variable simulated by the model and the corresponding value derived by remote sensing, by the re-parameterization and/or reinitialization of the crop production model.

By assuming that the biophysical processes are well described by the model, the procedure is addressed to estimate the initial conditions, for instance by adjusting the initial LAI value (day of emergence) or using the detection of the temporal occurrence of max LAI to re-define sowing date.

A detail description of the different methods of coupling remotely sensed data and crop models is provided by Moulin *et al*. (1998).

Next steps

The intention of this "call for interest" is to network scientists in the rice – modelling field. This network could identify more appropriate tools to develop conjoint researches as Concerted Actions. This topic could be discussed in a meeting which will be possibly sponsored by the JRC in the next future.

Acknowledgment

We gratefully acknowledge the Italian Association of Agrometeorology (AIAM) for giving us the opportunity of publishing this letter and for the fundamental help in creating some of the contacts which have led to the birth of the WARM group.

References

Ambrosetti, P., Mariani, L., Scioli, P., 2000. Climatology of North foehn in Canton Ticino and West Lombardy. Rivista Italiana di Agrometeorologia, article in press.

Bellocchi, G., Acutis, M., Fila, G., Donatelli, M., 2002. An indicator of solar radiation model performance based on a fuzzy expert system. Agronomy Journal, 94, 1222-1233.

Bocchi S., A.Callegarin, G. Baldi. 2003. Rice production system in Italy and its sustainability. Proceedings of the 3rd International Temperate Rice Conference, 2003, March 10 – 13, Punta del Este, Uruguay, 19 – 22.

Boschetti, M., Colombo, R., Meroni, M., Busetto, L., Panigada, C., Brivio, P.A., Marino, C.M., Miller, J.R., 2002. Use of Semi-empirical and Radiative Transfer Models to Estimate Biophysical Parameters in a Sparse Canopy Forest" Proceedings of SPIE 9th International Symposium on Remote Sensing 22-27 September 2002, Capsis Sofitel Conference Center,Agia Pelagia,Crete, Greece. Pp.133-144.

Boschetti, M., Mauri, E., Gadda, C., Busetto, L., Confalonieri, R., Bocchi, S., Brivio, P.A., 2004. Monitoring paddy rice crops through remote sensing: productivity estimation by light use efficiency model. Proceedings of SPIE Remote Sensing 2004, 13–16 September 2004, Maspalomas, Gran Canaria, Canary Islands, Spain.

Bouraoui, F., Vachaud, G., Haverkamp, R., Normand, B., 1997. A distributed physical approach for surface-subsurface water transport modeling in agricultural watersheds. Journal of Hydrology, 203, 79-92.

Confalonieri, R., 2003. Evaluation of the sustainability of the modern management techniques of agroecosystems. Agroecological indicators, simulation models, thematic cartography. Ph.D. Thesis, University of Milan, 240pp.

Confalonieri, R., 2005. GAIA: a new model for the simulation of plant growth. Joint Research Centre of the European Commission. Internal Report. Ispra, Varese, Italy.

Confalonieri, R., Bechini, L., 2004. A preliminary evaluation of the simulation model CropSyst for alfalfa. European Journal of Agronomy, 21, 223-237.

Confalonieri, R., Bocchi, S., 2005. Evaluation of CropSyst for simulating the yield of flooded rice in northern Italy. European Journal of Agronomy, article in press.

Confalonieri, R., Mariani, L., Bocchi, S., 2004. PREDA: a prototype of a rice cold damage early warning system at high latitudes. Proceeding of the International Rice Cold Tolerance Workshop, Canberra, Australia, 22-23 July 2004.

Confalonieri, R., Mariani, L., Bocchi, S., 2005. Analysis and modelling of water and near water temperatures in flooded rice (Oryza sativa L.). Ecological Modelling, 183, 269-280.

Fila, G., Bellocchi, G., Donatelli, M., Acutis, M., 2003. IRENE DLL: A class library for evaluating numerical estimates. Agronomy Journals, 95, 1330-1333.

Gaouna, B.O., Stroppiana, D., Sarfatti, P., Ungano, F., 2003. Crop yield reduction estimation using the FAO-CROPWAT model: a case study in Southern Chad. Journal of Agriculture and Environment for International Development, 97, 139-164.

Goodes, C.M., Mariani, L., Palutikof, J.P., Menichini, V., Minardi, G.P., 1997. Estimating future climates in the Mediterranean. In: Mairota, P., Thornes, J.B., Geeson, N. (Eds.), Atlas of Mediterranean Environment in Europe: the desertification context, John Wiley and Sons, London, 38-42.

Mahmood, R., 1998. Air temperature variations and rice productivity in Bangladesh: a comparative study of the performance of the YIELD and the CERES-Rice models. Ecological Modelling, 106, 201-212.

Mariani, L., 2004. Clima urbano e progettazione del verde. In: Pirani, A. (Ed.), Il Verde in città – La progettazione del verde negli spazi urbani, Edagricole, 85-93.

Mariani, L., Menichini, V., Abelli, S., Ferroni, S., 1998. Weather types and thermopluviometric features of italian area, in The Earth's Changing Land, GCTE-LUCC Open Science Conference on Global Change, Barcelona, 14-18 March 1998.

Mariani, L., Sovrano Pangallo, G., 2001. Effetti urbani di piccoli centri della pianura lombarda sulla temperatura dell'aria. Acqua Aria, 97-104.

Monteith, J.L., 1996. The quest for balance in crop modeling. Agronomy Journal, 88, 695-697.

Moulin, S., Bondeau, A., Delecolle, R., 1998. Combining agricultural crop model and satellite observation: from field to regional scales. International Journal of Remote Sensing, 19, 1021-1036.

Nelder, J.A., Mead, R., 1965. A simplex method for function minimization. Computer Journal, 7, 308-313.

Stöckle, C.O., 1992. Canopy photosynthesis and transpiration estimates using radiation interception models with different levels of detail. Ecological Modelling, 60: 31-44.

Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. European Journal of Agronomy, 18:3/4, 289-307, Second special issue "2nd International Symposium on Modelling Cropping Systems - Florence, Italy".

Uehara, G., Tsuji, G.Y., 1993. The IBSNAT project. In Systems approaches for sustainable agricultural development, eds F.W.T. Penning de Vries, P. Teng, and K. Metselaar. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands. pp. 505-513.

Van Ittersum, M.K., Lefelaar, P.A., Van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L., Goudrian, J., 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. European Journal of Agronomy, 18, 201-234.

Van Keulen, H., Penning de Vries, F.W.T., Drees, E.M., 1982. A summary model for crop growth. In: Penning de Vries, F.W.T., Van Laar, H.H. (Eds.), Simulation of Plant Growth and Crop Production. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 87-98.

Vidotto, F., Ferrero, A., Ducco, G., 2001. A mathematical model to predict Oryza sativa var. sylvatica population dynamics. Weed Research, 41, 407-420.

Vidotto, F., Ferrero, A., 2004. Modelling population dynamics to overcome feral rice in rice. In: J. Gressel (Ed.) Crop ferality and volunteerism: a threat to food security in the transgenic era? CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 353-368.

Williams, R.L., Angus, J.F., 1994. Deep floodwater protects high-nitrogen crops from low-temperature damage. Proceeding of the Temperate Rice Conference "Temperate Rice – achievements and potential", 21-24 February, Yanco, Australia, 671-680.

Yan, W., Hunt, L.A., 1999. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. Annals of Botany, 84, 607-614.

L'ATLANTE AGROCLIMATICO DEL TERRITORIO ITALIANO REALIZZATO NEL PROGETTO DI RICERCA "CLIMAGRI"

ITALIAN AGROCLIMATIC ATLAS CARRIED OUT IN THE FRAMEWORK OF "CLIMAGRI" RESEARCH PROJECT

Luigi Perini[1]*

[1]: *C.R.A. - Ufficio Centrale di Ecologia Agraria (UCEA)Via del Caravita, 7/a 00186 Roma*
* *Corresponding author, phone: +39 06 695311, fax: +39 06 69531215, e-mail: lperini@ucea.it*

Riassunto
La produzione agricola è soggetta a vari condizionamenti ambientali e, in particolar modo, ai mutevoli andamenti meteorologici. Negli ultimi anni il rischio dell'attività agricola connesso alle condizioni atmosferiche si è palesato ancora di più a causa della intensificazione dei segnali di cambiamento climatico, tanto che il Ministero delle Politiche Agricole e Forestali ha finanziato un progetto finalizzato di ricerche (CLIMAGRI) per accertarne le presumibili ricadute sul sistema agricolo ed individuare le possibili strategie di risposta. Fra i primi risultati del progetto si può annoverare la realizzazione di un Atlante Agroclimatico del territorio italiano quale punto di partenza per valutare successivamente in maniera oggettiva le eventuali variazioni climatiche in atto. Sono stati pertanto analizzati i dati meteorologici giornalieri del periodo 1961-1990 relativi a 544 nodi di una griglia di 30 x 30 Km (ottenuti con metodi di Kriging) ed i dati pedologici relativi ad una griglia di 8 x 8 Km derivati dalla Carta Nazionale della Capacità Idrica dei Suoli Agrari. Le elaborazioni hanno portato alla determinazione della climatologia delle temperature, precipitazioni, stagione di crescita, sommatorie termiche, accumulo di unità di freddo, frequenza di gelate, evapotraspirazione, bilancio idrico e date di fioritura e maturazione del Pesco. I risultati delle elaborazioni sono stati portati in ambiente GIS e georeferenziati. L'Atlante, disponibile su CD-rom è consultabile tramite un'applicazione software appositamente realizzata.

Parole chiave: GIS, climatologia, analisi territoriale

Abstract
Every year there is a fluctuation of Agricultural yields mostly linked to environmental conditions. Especially in the last 10 – 15 years the meteorological course was often really different from the climatic normal, increasing the risk of agricultural activity. CLIMAGRI is a research project of the Italian Ministry of Agriculture realized in the framework of climatic variations and dealing with their effects on agriculture. One of the main purposes of this research is to evaluate the agricultural potential of Italian territory referring to soil-climate interactions. Climatic and Agroclimatic features of Italy were calculated using data of a standard period (1961-1990), according to WMO recommendations, estimated with Kriging's techniques. The dataset is composed of complete series of daily values: temperature (minimum and maximum), rainfall, sunshine, relative humidity and wind speed of 544 Italian sites homogeneously disseminated in a regular grid (30 x 30 Km). The pedological database has been set using information of the National Chart of Agrarian Soils Water Capacity. In order to represent Italian soils, the main pedological variables have been processed to realize a complete spatial representation through square cells with a surface of 64 km^2 (8 x 8 Km). The pedological variables are expressed as a weighted mean of the correlated soil measures. Data elaborations have been carried out on: Temperature, Growing Degree Days accumulation, Rainfall, Growing Season (GS), Chilling Units, Frost frequencies, Reference crop evapotranspiration (ET_0), Soil Water Balance, Phenological elaborations (Peach Tree). All the results have been re-analysed and organized in a GIS format. The main goals were to represent the spatial magnitude of agroclimatic information and to realize a simple tool for the users.

Keywords: *GIS, climatology, land suitability*

Introduzione

L'accelerazione tecnologica degli ultimi decenni ha investito praticamente ogni settore della vita economica e sociale ed anche il panorama agricolo italiano è cambiato profondamente grazie alle innovazioni che hanno trovato applicazione nel settore. Non sempre, però, la profusione di mezzi tecnici associato talora allo sfruttamento intensivo delle risorse ambientali può rappresentare la risposta più adeguata al crescere e rapido mutare dei consumi. Non bisogna dimenticare, infatti, che l'agricoltura deve necessariamente fare i conti con l'ecosistema e, soprat-

tutto, con una variabile fortemente aleatoria: il clima. Le peculiarità climatiche e l'andamento meteorologico stagionale hanno da sempre condizionato la distribuzione territoriale delle colture ed il successo del loro ciclo produttivo. Anche oggi, tale realtà non può essere elusa né contrastata, bensì assecondata guardando al clima come ad uno dei tanti fattori della produzione agricola. La consapevolezza delle potenzialità espresse dal territorio e dal suo clima, ovvero la conoscenza dei limiti allo sfruttamento delle risorse naturali, può aiutare a realizzare un'attività agricola sostenibile, duratura, rispettosa dell'ambiente e vantaggiosa anche sotto il profilo economico.

Nell'ultimo decennio, purtroppo, si è palesato un ulteriore grado di complicazione rappresentato da una fitta sequenza di anomalie climatiche, soprattutto a carico dei tradizionali regimi termici e pluviometrici. Il Ministero delle Politiche Agricole e Forestali, attraverso il progetto finalizzato CLIMAGRI, ha voluto stimolare la comunità scientifica nazionale a fornire gli elementi conoscitivi che meglio potessero far comprendere il clima, i suoi ipotizzati cambiamenti e, soprattutto, le possibili conseguenze sull'agricoltura italiana. Le ricerche, coordinate dall'Ufficio Centrale di Ecologia Agraria (UCEA), condividono il comune obiettivo di acquisire un'analisi climatica del territorio nazionale per evidenziare, con il fine esplicito di prevenire, l'impatto degli eventi anomali o degli eventuali cambiamenti climatici sull'agricoltura italiana. In particolare, la linea di ricerca 2.1 *"Classificazione attitudinale a fini agricoli del territorio nazionale su base climatica e pedologica"* si è posta fra i suoi obiettivi la realizzazione di un'analisi a scala nazionale in grado di determinare l'attitudine agricola espressa dalle diverse interazioni di suolo e clima riscontrabili su tutto il territorio italiano. Come primo risultato è stato realizzato un *Atlante agroclimatico* in cui sono state individuate le caratteristiche pedoclimatiche di riferimento necessarie a descrivere le potenzialità espresse dal territorio e costituire il punto di partenza obbligato per valutare oggettivamente ampiezza e conseguenze di eventuali cambiamenti climatici. Un'applicazione pratica presentata nello stesso *Atlante agroclimatico,* soprattutto in relazione alla partecipazione alla ricerca del Dipartimento di Colture Arboree dell'Università di Palermo, riguarda l'analisi di alcune fasi fenologiche del Pesco. In particolare, sono state studiate le date di fioritura e maturazione così come indotte dalla temperatura ambiente ottenendo, per tale specifico caso, entità e distribuzione delle potenzialità territoriali.

Dati di base

Per effettuare le analisi climatiche e fenologiche presenti nell'*Atlante agroclimatico* è stato utilizzato un database ottenuto mediante *Analisi Oggettiva*[1] realizzata sulle osservazioni meteorologiche originarie presenti nella Banca Dati Agrometeorologica Nazionale (BDAN)[2]. Il database comprende, pertanto, le serie complete dei valori giornalieri di temperatura dell'aria (minima e massima), precipitazione piovosa, eliofania, umidità relativa e velocità del vento (a 10 m) stimati su 544 punti (*nodi di griglia*) del territorio italiano (fig.1) distribuiti omogeneamente sulla base di una griglia regolare con celle di 30 x 30 Km. Il periodo preso in considerazione (1961-1990), corrisponde al trentennio più recente indicato dall' Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM/ WMO) quale riferimento convenzionale per le analisi ed i confronti climatologici.

Il database pedologico[3] del territorio italiano deriva invece da un'elaborazione della Carta Nazionale della Capacità Idrica dei Suoli Agrari. La definizione delle unità di suolo-paesaggio è stata realizzata integrando l'informazione litologica dedotta dalla Carta Geologica 1:100.000 e l'insieme delle caratteristiche fisiografiche desumibili da immagini da satellite prodotte alla stessa scala. In relazione alle esigenze di rappresentazione dei suoli italiani, le principali variabili pedologiche sono state elaborate per realizzare una opportuna rappresentazione spaziale. L'unità di riferimento è una cella quadrata di superficie pari a 64 km2. Il numero di celle che complessivamente coprono il territorio italiano è pari a 5226. Di queste, 4479 presentano informazioni pedologiche associate, mentre le rimanenti 747 sono risultate prive di informazioni in quanto non intersecanti nessuna unità suolo-paesaggio agricola. Il valore delle variabili pedologiche attribuito a ciascuna cella è stato stimato come media ponderata dei valori nelle unità di suolo-paesaggio che intersecano la cella utilizzando, come fattore di ponderazione, la superficie di ciascuna unità presente nella cella. È doveroso precisare che questa modalità di calcolo ha condotto ad un'approssimazione delle caratteristiche pedologiche rispondente alle specifiche esigenze del presente lavoro ma potrebbe aver prodotto rappresentazioni non coerenti alla realtà se riferite a scale spaziali o finalità diverse. Ad esempio, i valori medi delle frazioni granulometriche associati ad una cella (espressione di tutti i tipi di suolo in essa riconosciuti) sono stati utilizzati per simulare il ruolo del suolo nel bilancio idrico anche se nella realtà potrebbe non essere affatto presente in quella cella un suolo con tali caratteristiche. Vi sono, infine, molte celle che ricadono in buona parte su terreni non agricoli e che quindi hanno solo piccole intersezioni con unità suolo-paesaggio agricole (celle al bordo dei confini nazionali e celle che includono ampie superfici a bosco, acque interne, aree artificiali, pascoli, ecc). In queste situazioni i valori attribuiti all'intera cella derivano dalla porzione occupata esclusivamente dalle superfici agricole le cui proprietà, come ad esempio la profondità del terreno o la percentuale di scheletro, possono essere molto diverse, generalmente migliori, rispetto alle proprietà dei terreni non agricoli che complessivamente occupano la

[1] Le elaborazioni di *Analisi Oggettiva* sono state effettuate dalla Finsiel nell'ambito del Sistema Informativo Agricolo Nazionale (SIAN) del Ministero delle Politiche Agricole e Forestali.

[2] La *Banca Dati Agrometeorologica Nazionale (BDAN)* è stata realizzata in ambito SIAN. In essa sono archiviati i dati meteorologici delle reti di rilevamento UCEA e di altri Servizi Meteorologici italiani.

[3] I dati pedologici sono stati prodotti dal Consorzio ITA per conto del Ministero delle Politiche Agricole e Forestali nell'ambito del programma AGRIT.

cella. Le informazioni di base disponibili per ciascuna cella pedo sono:

- Codice ISTAT di regione (viene indicata la regione prevalente nella cella)
- Superficie interna alla cella occupata da unità suolo-paesaggio agricole (ha)
- Valore medio di profondità del suolo (mm)
- Valore medio di AWC (mm di acqua)
- Valore medio della percentuale di carbonio organico a circa 20 cm di profondità
- Valore medio della percentuale di sabbia
- Valore medio della percentuale di limo
- Valore medio della percentuale di argilla
- Valore medio della percentuale di scheletro

Elaborazioni dei dati

La base dati meteorologica, costituita dalle serie trentennali di dati giornaliere di 544 *celle meteo*, è stata preliminarmente sottoposta a vari controlli per valutarne la qualità e rimediare alla possibile presenza di errori e di fallanze. La metodologia utilizzata si è basata sulla verifica incrociata della congruità sequenziale di dati e statistiche (medie, totali, varianza) estesa anche ai nodi di griglia limitrofi. Ciò ha determinato la necessità di procedere ad una rielaborazione dell'*Analisi Oggettiva* per alcuni nodi di griglia che ha consentito di eliminare tutti gli elementi di disturbo individuati (*outlayers*, archiviazioni errate, ecc.).

Temperatura

A partire dai singoli valori di temperatura minima e massima sono state calcolate le temperature medie giornaliere e, quindi, si è proceduto a calcolare le medie climatiche decadali delle suddette grandezze.

Sommatorie termiche

Per ciascun giorno della serie dei dati è stato calcolato l'accumulo giornaliero di G*radi Giorno* o G*rowing Degree Days* (GDD) utilizzando cinque diversi valori di temperatura base: 0, 5, 10, 15 e 20°C. Il calcolo della climatologia delle sommatorie termiche è stato successivamente effettuato su base decadale come media delle rispettive sommatorie cumulate sull'intero trentennio.

Precipitazione piovosa

Partendo dai dati giornalieri di *precipitazione piovosa* sono stati calcolati i singoli totali mensili di precipitazione relativi a ciascun anno del trentennio analizzato. La climatologia mensile dei totali di precipitazione è stata calcolata come 50° percentile dei 30 valori ottenuti per ognuno dei dodici mesi dell'anno.

Stagione di Crescita (SC)

È stata definita *Stagione di Crescita* il periodo dell'anno durante il quale le temperature medie giornaliere risultano stabilmente al di sopra di determinate *soglie termiche*. È stato stimato per ciascun anno della serie esaminata l'*inizio*, la *fine* e la *durata* della SC. La climatologia riguardante la SC è stata ottenuta individuando come data iniziale quella corrispondente al 75° percentile della serie delle date annuali ordinate in senso crescente. Stessa procedura per determinare la data climatologica di fine della SC che è stata individuata come 75° percentile della rispettiva serie di date annuali ordinate, però, in senso decrescente. Le elaborazioni della SC sono state effettuate per tre diverse temperature soglia: 5°C, 10°C e 15°C.

Gelate

La climatologia delle gelate è stata determinata calcolando la frequenza media di tutte le occorrenze di temperature minime giornaliere inferiori a 0°C verificatesi in ogni singola decade dell'anno. È stata calcolata analogamente anche la frequenza delle gelate all'interno del periodo definito come Stagione di Crescita (potenzialmente le più pericolose per le colture in atto) distinguendo fra due casi: le gelate tardive primaverili (computate dall'inizio della SC al 31 luglio) e le gelate precoci autunnali (computate dal 31 luglio alla fine della SC).

Fabbisogno in freddo

La stima delle *Unità di freddo* è stata effettuata calcolando preliminarmente i gradienti orari fra le temperature massime e minime giornaliere supponendo uno sfasamento di 12 ore ed un andamento lineare della temperatura tra i due valori. Ciò ha consentito di stimare le temperature orarie che, raggruppate in opportune classi e con riferimento al Chill Unit Model, hanno condotto alla stima delle equivalenti *Unità di freddo*.

Evapotraspirazione di riferimento (ET_0)

Per la stima dell'*evapotraspirazione* giornaliera è stata utilizzata la formula di Penman-Monteith nella versione FAO (Allen R.G. *et al*., 1998).

Bilancio idrico dei suoli

È stato sviluppato un modello originale di bilancio idrico dei suoli al fine di conciliare le specifiche esigenze di rappresentazione dei fenomeni indagati con un adeguato dettaglio spazio-temporale. In ogni caso, le impostazioni teorizzate hanno seguito un approccio classico prevedendo apporti (precipitazioni) e perdite (ET_0, run off, percolazione) di acqua in relazione alle caratteristiche del suolo sottostante (tessitura, profondità, potenziale matriciale, AWC, ecc.). È stata quindi calcolata la climatologia decadale del deficit idrico derivato dal rapporto tra la richiesta evapotraspirativa e la evapotraspirazione effettiva.

Elaborazioni fenoclimatiche

Le elaborazioni hanno riguardato fondamentalmente la coltura del Pesco ed, in particolare, la determinazione della data di fioritura e maturazione. Ai fini del superamento della endo-dormienza invernale è stato utilizzato il modello Utah (Richardson *et al*., 1974), mentre per il calcolo delle sommatorie termiche necessarie al superamento della eco-dormienza (Growin Degree Hours) la scelta è stata indirizzata verso il modello di tipo non-lineare denominato ASYMCUR (Anderson *et al*. - 1986)

Elaborazioni GIS

Le possibilità offerte dai sistemi GIS (Geographical Information System) consentono di georeferenziare dati e di elaborare molteplici strati informativi che possono essere opportunamente incrociati e selezionati. Nel caso dell'Atlante i dati di base ed i risultati ottenuti dalle elaborazioni precedentemente descritte, sono stati ulteriormente elaborati con procedure e strumenti GIS (Geographical Information System) per analizzarne la dimensione geografica al fine di generare informazioni territoriali integrative e derivare le opportune rappresentazioni grafiche. In tal senso è stata realizzata anche un'applicazione multimediale per consentire una consultazione delle mappe dell'Atlante in maniera semplice ed efficace. In primo luogo è stato necessario organizzare i dati in una struttura utile alla successiva elaborazione e rappresentazione GIS ed è stato anche necessario uniformare l'unità territoriale di riferimento alla *cella pedo* allo scopo di consentire l'elaborazione di dati specifici che, come nel caso del bilancio idrico, hanno richiesto l'intersezione dei dati associati alle *celle meteo* con quelli riferibili alle *celle pedo.* Agli *strati informativi* o *layer* così ottenuti sono stati aggiunti alcuni *layer* legati all'orografia al fine di delineare le aree che, in ragione sia di quote troppo elevate che di eccessive pendenze, mostrassero un valore marginale ai fini della coltivabilità. Per migliorare la leggibilità delle mappe e, quindi, facilitare "l'esplorazione" del territorio nazionale, sono stati aggiunti una serie di altri *layer* costituiti dai limiti amministrativi e da altri elementi fisici quali i confini nazionali, regionali e provinciali, i principali fiumi, i principali corpi idrici, i principali centri urbani.
È stato infine adottato stato per tutti i dati inclusi nel database geografico un sistema di proiezione unico, ovvero l'European Datum 1950, UTM Zona 32N.

Contenuto dell'Atlante

L'Atlante è costituito nel complesso da 14 tematismi per un totale di oltre 340 layers diversi. Alcuni di essi, di specifico carattere geografico, sono attivabili in ogni mappa per facilitare la lettura dei dati e/o l'orientamento all'interno delle stesse mappe (confini regionali, confini provinciali, fiumi principali, corpi idrici principali, città principali, maschera per le quote superiori ai 1500 m, maschera per le pendenze superiori al 30%, nodi della griglia meteo, celle pedo, ombreggiatura).
Le informazioni disponibili sono le seguenti:

<u>Orografia</u>
- DTM 250 m
- Esposizioni
- Pendenze
- Pedologia
- Profondità suoli
- Tessitura suoli / (classifica USDA)
- AWC (mm)

<u>Precipitazioni</u>
- Climatologia mensile (es. Fig. 2)

<u>Temperatura minima</u>
- Climatologia decadale

<u>Temperatura massima</u>
- Climatologia decadale

<u>Temperatura media</u>
- Climatologia decadale (es. Fig. 3)

<u>Unità di freddo</u>
- Climatologia decadale

<u>Sommatorie termiche</u>
- Climatologia decadale

<u>Stagione di Crescita</u>
- Inizio (data)
- Fine (data)
- Durata (numero di giorni)

<u>Gelate tardive e precoci</u>
- Gelate primaverili (numero medio eventi) (es. Fig. 4)
- Gelate autunnali (numero medio eventi)

<u>Gelate decadali</u>
- Climatologia decadale

<u>Evapotraspirazione di riferimento (ET_0)</u>
- Climatologia decadale (es. Fig. 5)

<u>Bilancio idrico dei suoli (deficit idrico)</u>
- Climatologia decadale (es. Fig. 6)

<u>Fenologia (Pesco)</u>
- Data di fioritura (per varietà con fabbisogno in freddo da 200 a 1200 C.U.) (es. Fig. 7, 8)
- Data di maturazione (per varietà con fabbisogno da 20000 a 80000 GDH) (es. Fig. 9)

La consultazione dell'Atlante, anche in assenza di un software GIS installato sul proprio sistema, è reso possibile attraverso un software applicativo realizzato con componenti software MapObjects Lt della Esri disponibile, insieme a tutte le mappe e gli strati informativi elaborati, su un CD allegato alla pubblicazione cartacea (fig. 1). L'applicazione, una volta installata, consente l'accesso ad una *finestra iniziale* che, a sua volta, permette di attivare il <u>visualizzatore</u> (*browser*) delle mappe e anche le <u>pagine di presentazione</u> dell'intera opera.
Il dettaglio spaziale elementare, cui fanno riferimento tutte le informazioni elaborate, è rappresentato da un grigliato di celle quadrate di 8 x 8 km (coincidente con le celle pedo). La consultazione dell'Atlante avviene, pertanto, con le tipiche funzionalità consentite da un GIS: *dalla barra dei contenuti* si seleziona la mappa d'interesse (ad esempio: la temperatura media), quindi sulla barra dei temi compaiono tutti gli strati informativi associati a quella mappa (ad esempio: le temperature medie della 15^{ma} decade dell'anno) che possono essere selezionati per apparire nella vista della stessa mappa(fig. 10). Utilizzando gli strumenti presenti nella barra dei *bottoni di navigazione ed informazione* è possibile, poi, dimensionare la vista al livello di ingrandimento in funzione del dettaglio desiderato, visualizzare la legenda, attivare la funzione di *informazione sul punto*, impostare *query* di ricerca, ed altre funzionalità ancora (fig. 11).
L'Atlante, oltre a rappresentare un riferimento oggettivo per l'apprezzamento degli eventuali cambiamenti climatici in atto, può favorire una più approfondita conoscenza delle caratteristiche ambientali, clima e suolo in particolare, ed essere di ausilio nella pianificazione dell'attività agricola, dalle fasi di scelta ed introduzione degli indirizzi produttivi fino alla programmazione degli interventi colturali.
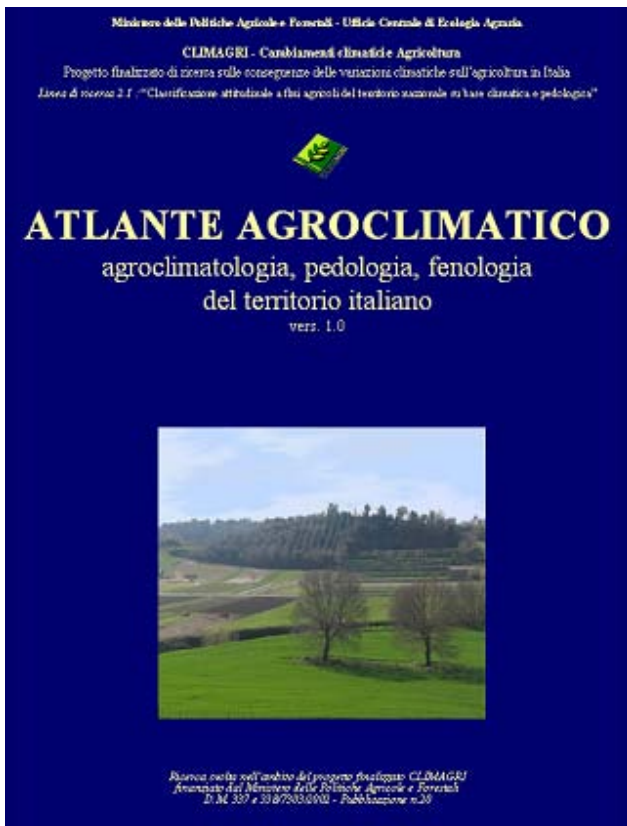
Fig. 1 - Copertina del volume "Atlante Agroclimatico"
Fig. 1 *– Cover of the volume "Atlante Agroclimatico"*

Fig. 2 - Precipitazione piovosa media mensile (Luglio)
Fig. 2 *– Average monthly precipitation (July)*
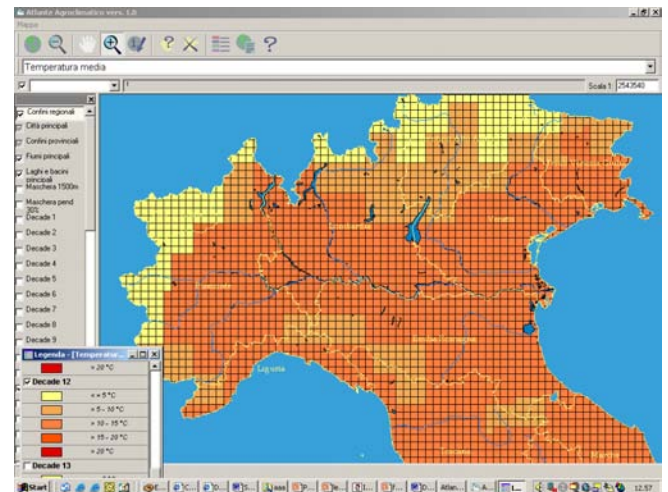
Fig. 3 - Temperatura media decadale (3ª decade di aprile)
Fig. 3 *- Average dekadal temperature (3rd decade of April)*
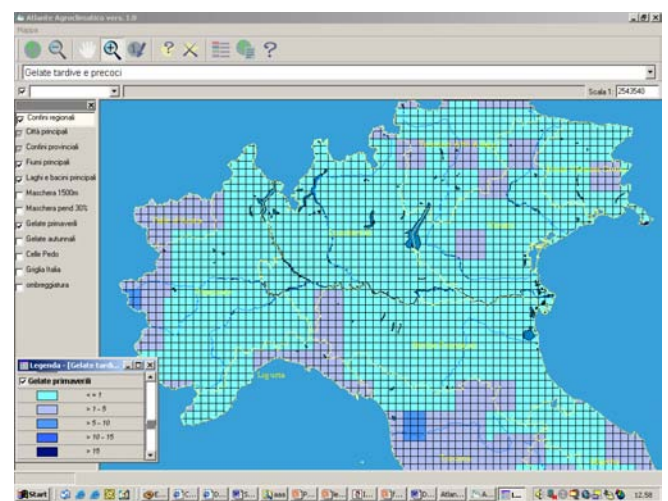
Fig. 4 - Numero di occorrenze di gelate primaverili (comprese fra l'inizio della stagione di crescita ed il 31 luglio). La stagione di crescita è stata calcolata considerando una soglia termica di 5°C.
Fig. 4 *- Number of spring frost events (between the beginning of the growing season and July 31). The growing season is computed considering a threshold temperature of 5 °C*

Fig. 5 - Valori di ET_0 (calcolata secondo la formula di Penman) della seconda decade di luglio
Fig. 5 *- ET_0 values (computer according to Penman) for the second dekad of July*
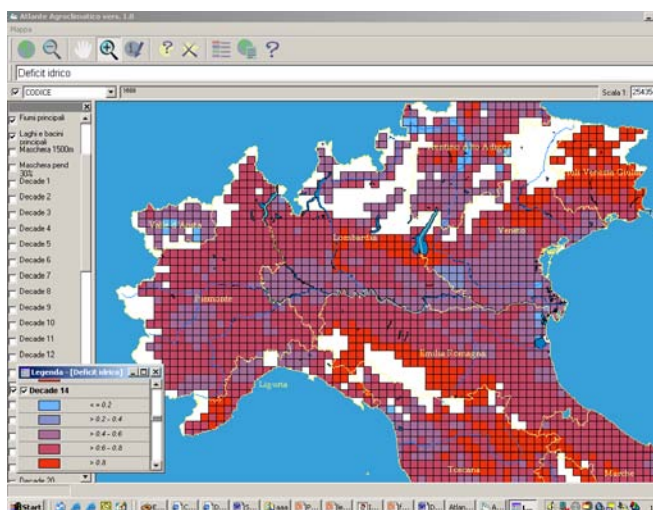
Fig. 6 - Deficit idrico dei suoli nella seconda decade di maggio
Fig. 6 *- Soil water deficit of the second dekad of May*
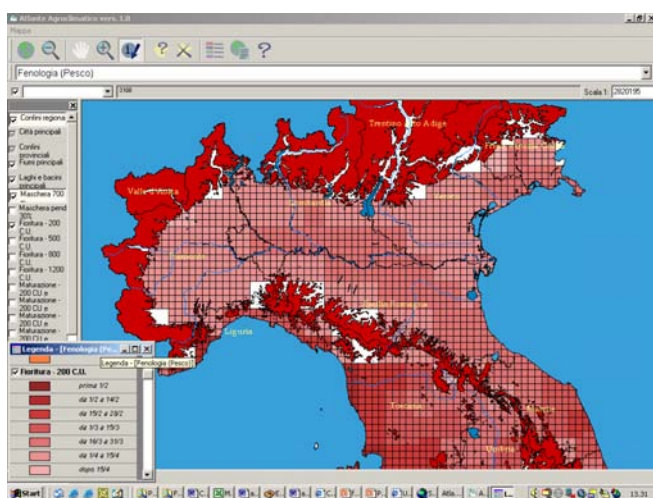
Fig. 7 - Data di fioritura di varietà di pesco con esigenze di accumulo di 200 Chilling Units
Fig.7 *- Flowering date of peach tree varieties requiring the accumulation of 200 Chilling Units*
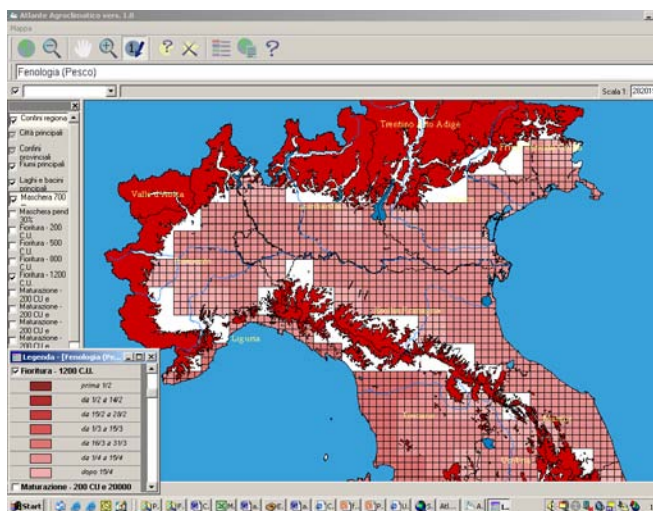
Fig. 8 - Data di fioritura di varietà di pesco con esigenze di accumulo di 1200 Chilling Units
Fig. 8 *- Flowering date of peach tree varieties requiring the accumulation of 1200 Chilling Units*
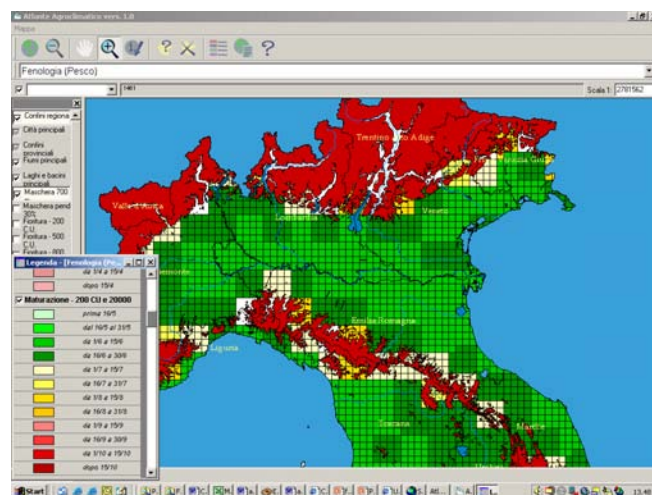
Fig. 9 - Data di maturazione di varietà di pesco con esigenze di accumulo di 200 Chilling Units e 20000 GDH
Fig. 9 *- Maturity date of peach tree varieties requiring the accumulation of 200 Chilling Units and 20000 GDH*
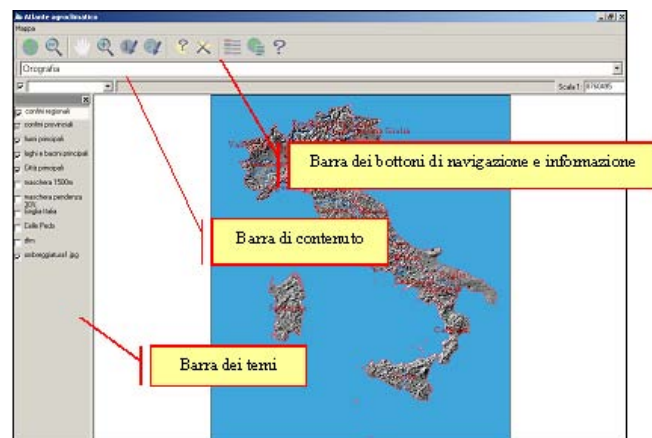
Fig. 10 - Schermata esemplificativa del visualizzatore GIS
Fig.10 *- A sample window from the GIS visualizer*
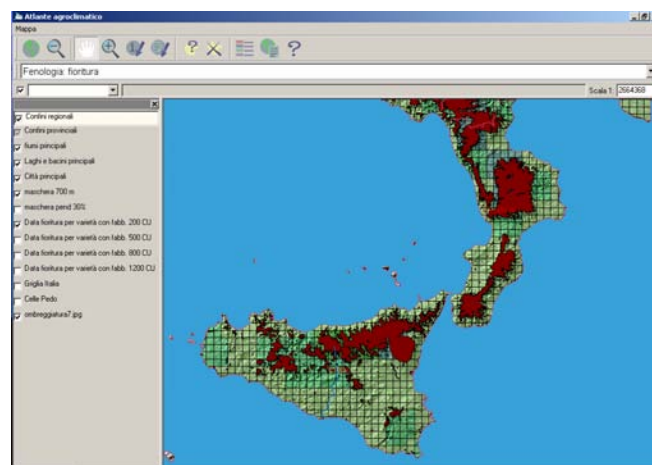
Fig. 11 - Esempio di "vista" di una mappa (data di fioritura di varietà di Pesco con fabbisogno di 200 C.U). Nella visualizzazione, oltre allo specifico strato informativo, sono stati attivati i layer relativi a: confini regionali, laghi e bacini principali, città principali, maschera di non coltura (700 m) e ombreggiatura.
Fig. 11 *- Example of a map view (flowering date of peach tree varieties requiring the accumulation of 200 C.U.). In the view, besides the specific information layer, the following ones are also activated: regional borders, main lakes and catchments, main cities, no-crop mask (700 m) and shading*

ATLANTE CLIMATOLOGICO DELLA SICILIA – SECONDA EDIZIONE

CLIMATOLOGICAL ATLAS OF SICILY – SECOND EDITION

Antonino Drago [1]*

[1]: *Regione Siciliana – Assessorato Agricoltura e Foreste SIAS - Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano*
**: Corresponding author, e-mail adrago@regione.sicilia.it*

Riassunto
Le elaborazioni climatologiche possono avere numerosi risvolti applicativi su vari campi delle attività umane: gestione del territorio, salvaguardia dell'ambiente, attività di programmazione, sia a livello politico che tecnico. La conoscenza dettagliata del clima in tutte le sue manifestazioni consente di guardare i fenomeni atmosferici più come risorsa, che come avversità. Questo lavoro presenta i risultati di molte elaborazioni statistiche su un dataset climatico trentennale, di temperatura e precipitazioni, disponibile per la regione Sicilia. Sono presentate numerose elaborazioni tabulari, grafiche e cartografiche mesoclimatiche (rappresentazione alla scala 1:250000) e le relative metodologie di realizzazione. Il lavoro è disponibile su supporto cartaceo (solo alcune mappe) e su CD-ROM ed è consultabile sul sito web del SIAS, anche mediante interfacce WEB-GIS.

Parole chiave: Climatologia, analisi statistica, interpolazione spaziale, rappresentazioni grafiche e cartografiche, diffusione delle elaborazioni.

Abstract
Climatological processing could have a lot of pratical applications in different fields of human activities: territory management, environment protection, technical and political planning. Climatical knowledge allows to look at atmosferical phenomena as a resource, instead of an adversity. This work presents the results of numerous statistical analysis over a 30-years period climatical dataset, of temperature and precipitation, available for Sicily region. A lot of tables, graphics and thematic mesoscale maps (scale of representation 1:250000) and related methodologies are presented. The work is available on paper (just some maps), CD-ROM support, and on our web site, available in cartographical format, by means of WEB-GIS applications too.

Keywords: *Climatology, statistical analysis, spatial interpolation, graphical and cartographical representation, diffusion of informations.*

Introduzione

La climatologia studia le caratteristiche degli elementi meteorologici di una regione, attraverso l'analisi statistica di serie storiche di dati sufficientemente lunghe, in genere, in accordo con molti climatologi e con il WMO (World Meteorological Organization), quelle di un periodo trentennale.
Le elaborazioni climatologiche possono avere risvolti applicativi molto vasti e interessare numerosi campi delle attività umane, come la gestione del territorio nei suoi vari aspetti, la salvaguardia dell'ambiente e tutte le attività di programmazione, sia a livello politico che tecnico. La conoscenza dettagliata del clima in tutte le sue manifestazioni consente di guardare i fenomeni atmosferici più come risorsa, che come avversità.
Tra i settori maggiormente interessati alla climatologia ricordiamo:

- l'agricoltura, sia a livello di programmazione in generale, sia per la scelta della destinazione colturale nei diversi comprensori;
- la protezione dalle avversità atmosferiche, attraverso l'individuazione dei migliori mezzi necessari a limitarne i danni;
- l'idrologia, in relazione alla problematica dei dissesti e della conservazione del suolo e alla gestione delle risorse idriche;
- la protezione dell'ambiente, sia agricolo che urbano, anche in relazione alla diffusione di sostanze inquinanti.

In agricoltura, disporre di studi climatici dettagliati consente di definire specificamente e con precisione la vocazionalità dell'ambiente nei confronti di una determinata coltura.
E' noto, infatti, che aree anche geograficamente vicine possono presentare differenze climatiche talvolta consistenti, soprattutto in dipendenza di una differente situazione orografica o topografica.
Non tenere conto di questi elementi può comportare scelte sbagliate, con notevoli ripercussioni economiche e ambientali.
Utilizzare la climatologia in agricoltura serve quindi ad effettuare scelte ottimali, alla luce della naturale predispo-

sizione di ciascun ambiente nel soddisfare le esigenze delle diverse colture, esaltandone le caratteristiche produttive e limitando, al contempo, i rischi di avversità atmosferiche e i danni causati dalle avversità biotiche (malattie crittogamiche, insetti, ecc.).
I mercati agricoli chiedono sempre più produzioni di qualità, dalle caratteristiche organolettiche e nutrizionali elevate, ma anche prodotti "fuori stagione" (precoci, tardivi, ecc.) capaci di reggere la concorrenza dei mercati esteri. Occorre quindi coniugare bene il potenziale genetico delle specie con le risorse che l'ambiente può offrire. Per questo, ad esempio, la coltivazione di cultivar precoci o l'introduzione di specie tropicali e subtropicali è possibile, negli ambienti meridionali, solo in quelle aree in cui le temperature dei mesi autunno-invernali non comportino rischi di gelate e non si verifichino repentini abbassamenti termici, e dove le temperature non si innalzino eccessivamente durante il periodo fioritura-maturazione.
Anche le caratteristiche organolettiche e merceologiche del prodotto sono influenzate dall'andamento meteorologico. Le arance pigmentate, ad esempio, raggiungono la loro colorazione caratteristica in seguito alle elevate escursioni termiche giornaliere, nel periodo della maturazione, mentre l'accumulo degli zuccheri, nello stesso periodo, è favorito da temperature sufficientemente alte. Al contrario, la qualità dei mosti delle uve risulta peggiorata da temperature elevate durante la fase di maturazione dei grappoli.
La conoscenza approfondita dell'andamento di alcuni elementi meteorologici (radiazione solare, vento, ecc.) può essere di grande aiuto, inoltre, per la definizione dei criteri costruttivi degli apprestamenti protettivi (serre, tunnels, ecc.).
Un altro settore, assai caro soprattutto all'agricoltura del Meridione, in quanto legato ai problemi della cronica e crescente carenza d'acqua, è quello dell'idrologia. L'acqua è una risorsa insostituibile e preziosa, anche perché, purtroppo, limitata e sempre più contesa tra i diversi ambiti delle attività umane. Per questo motivo è necessario gestirla in modo ottimale. Nel settore agricolo, un corretto uso dell'acqua deve perciò partire dalla conoscenza delle aree interessate da apporti meteorici mediamente consistenti e di quelle caratterizzate, invece, da apporti scarsi; deve prevedere lo studio dell'andamento stagionale delle precipitazioni, della durata del periodo in cui esse sono assenti (periodo secco) e delle probabilità con cui certi eventi estremi, in eccesso o in difetto, si manifestano.
Inoltre, conoscere la frequenza con cui certi eventi estremi si verificano è di grande utilità per le fasi progettuali relative alla costruzione di dighe, invasi ed altre opere di carattere ingegneristico, legate alla conservazione delle risorse idriche e alla tutela del territorio.

Dopo la pubblicazione, nel 1998, dei volumi "Climatologia della Sicilia", con la quale si è fornito un primo quadro di riferimento per la caratterizzazione climatica della Sicilia, con questo nuovo lavoro si arricchisce l'informazione climatologica, attraverso dei procedimenti di spazializzazione alla mesoscala (distribuzione territoriale delle variabili meteorologiche studiate) dei dati puntuali le variabili meteorologiche studiate) dei dati puntuali di base e le successive rappresentazione cartografica alla scala 1:250000. Le diverse elaborazioni hanno consentito di definire ancora più dettagliatamente il clima delle diverse aree della nostra regione. Rispetto a quanto già pubblicato nella "Climatologia della Sicilia", in questa seconda edizione dell'"Atlante climatologico della Sicilia" è da evidenziare la disponibilità dello studio di alcuni eventi estremi, quelli cioè che assumono carattere di eccezionalità, sia in eccesso che in difetto, la cui conoscenza permette una più completa e corretta interpretazione dei fenomeni studiati. Questo lavoro di caratterizzazione climatologica, costituito dall'insieme delle elaborazioni a livello puntuale (sui singoli siti di rilevamento) e a livello territoriale(carte tematiche), oltre che dei dati mensili di base, rappresenta quindi un ulteriore passo nella definizione del clima della nostra regione.
Tutte le elaborazioni contenute nell'"Atlante" sono pure pubblicate tra le pagine del sito web del SIAS. In particolare, le elaborazioni puntuali sono disponibili in formato pdf, nella sezione "Pubblicazioni", mentre le elaborazioni cartografiche sono consultabili attraverso interfacce WEB-GIS, nella sezione "Cartografia tematica", anche attraverso l'importante ausilio della cartografia di base IGM.

La Sicilia, la più grande isola del Mediterraneo e la più grande regione italiana, con una superficie complessiva di circa 25.000 km^2, si estende in latitudine fra circa 36° e 38° nord e in longitudine fra circa 12° e 15° est.
Pur in presenza di una situazione orografica molto articolata, con aspetti morfologici singolari, è possibile suddividere sommariamente il territorio in tre distinte macroaree: il macro-versante settentrionale, che si estende da Capo Peloro a Capo Lilibeo; il macro-versante meridionale, che va da Capo Lilibeo a Capo Passero; ed infine il macro-versante orientale, che si estende da Capo Passero a Capo Peloro.
L'orografia mostra complessivamente dei contrasti netti tra la porzione settentrionale, prevalentemente montuosa, quella centro-meridionale e sud-occidentale, essenzialmente collinare; quella tipica di altopiano, presente nella zona sud-orientale, e quella vulcanica nella Sicilia orientale.
Considerando le condizioni medie dell'intero territorio, la Sicilia, secondo la classificazione macroclimatica di Köppen, può essere definita una regione a clima temperato-umido (di tipo *C*) (media del mese più freddo inferiore a 18 °C ma superiore a -3 °C) o, meglio, mesotermico umido sub-tropicale, con estate asciutta (tipo *Csa*), cioè il tipico clima mediterraneo, caratterizzato da una temperatura media del mese più caldo superiore ai 22 °C e da un regime delle precipitazioni contraddistinto da una concentrazione delle precipitazioni nel periodo freddo (autunno-invernale). Tuttavia, questa definizione ha appunto un valore solamente macroclimatico, cioè serve a distinguere, ad esempio, il clima siciliano da quello del Medio Oriente o dell'Europa centrale.
Secondo Pinna, se si passa infatti all'analisi di quanto può trovarsi all'interno del clima temperato del tipo *C* di Köp-

pen, si possono già distinguere diversi sottotipi: clima temperato subtropicale, temperato caldo, temperato sublitoraneo, temperato sub-continentale, temperato fresco, ognuno dei quali è riscontrabile nelle diverse aree del territorio della nostra regione.
D'altronde, se guardiamo un po' più dettagliatamente i diversi regimi termo-pluviometrici delle stazioni considerate in questo studio, possiamo notare che la temperatura media annua varia dagli 11 °C di Floresta fino ai 20 °C di Gela, mentre le precipitazioni totali annue oscillano da un valore medio annuo (mediana) di 385 mm a Gela (CL) fino ai 1192 mm a Zafferana Etnea (CT).
Occorre inoltre precisare che tali differenze sono spesso riscontrabili non solo tra zone molto distanti e con altitudine e distanza dal mare profondamente diverse, quali appunto Gela e Zafferana E. Infatti, se confrontiamo quest'ultima località, situata sul versante orientale delle pendici dell'Etna, con un'altra posta invece sul versante occidentale, Bronte, non molto diversa per altitudine e latitudine, notiamo che le precipitazioni medie annue in quest'ultima sono di appena 548 mm: poco più della metà, rispetto alla precedente località.
Partendo da queste considerazioni, pertanto, occorre sottolineare come lo studio climatico del territorio siciliano non risulta affatto semplice; e il grado di complessità va aumentando, se dai valori medi annui passiamo a quelli mensili, oppure se analizziamo gli eventi estremi delle temperature massime e minime, o gli eventi piovosi eccezionali. In quest'ultimo caso, infatti, la variabilità spaziale e temporale diventa molto elevata, principalmente a causa della complessità morfologica del territorio regionale, di cui prima si è fatto cenno.

Materiali e Metodi

Per questo studio sono stati utilizzati i dati del trentennio 1965-1994 del Servizio Idrografico Regionale, che ha nel tempo costituito l'archivio di dati più ricco e più antico esistente in Sicilia, con rilevazioni che partono in qualche caso anche dalla fine del 1800, e al quale di ciò vanno i meriti e i ringraziamenti.
Delle numerose stazioni presenti in archivio, ne sono state scelte 55 termopluviometriche e 124 pluviometriche, preferendo quelle che consentissero la maggiore copertura possibile del territorio regionale, individuate possibilmente tra quelle che presentavano l'intero trentennio climatico.
Scelte le stazioni, è stato quindi costituito l'archivio informatico, utilizzando un programma commerciale di foglio di calcolo elettronico, opportunamente organizzato per la successiva elaborazione. Sono stati quindi inseriti i valori mensili e giornalieri, medi ed estremi, delle temperature massima e minima, i valori totali mensili e giornalieri delle precipitazioni e i valori di intensità massima di precipitazioni ad un'ora e a ventiquattro ore; questi ultimi, su base annuale, associati ai mesi in cui si sono verificati gli eventi.
Sull'archivio provvisorio è stata quindi avviata una procedura automatizzata di controllo di qualità dei dati, per verificarne l'attendibilità. Tramite apposite funzioni del foglio elettronico e con istruzioni opportunamente implementate, sono state condotte due tipologie di controllo di qualità dei dati meteorologici: *controllo climatico* e *controllo spaziale*.
Dopo questi controlli, sui dati sospetti si è comunque eseguito un ulteriore controllo manuale; è stato così alla fine possibile scartare i dati non attendibili e passare successivamente alla fase di *ricostruzione statistica dei dati*.
Per un'analisi climatologica fedele sono infatti indispensabili, per ciascuna stazione in esame, delle serie storiche continuative. Si impone quindi la necessità, nei casi in cui una stazione presenti delle lacune di dati, di provvedere alla ricostruzione di quelli mancanti.
Se, ad esempio, si escludesse un anno in cui la piovosità fosse stata bassissima, dalle elaborazioni risulterebbe, erroneamente, che quella stazione è interessata da valori pluviometrici più alti di quelli reali. Di conseguenza, pur con i limiti che porta con sé un dato ricostruito, esso è senz'altro preferibile ad un dato mancante, il quale andrebbe ad inficiare in modo assai più evidente l'elaborazione statistica.
Nei casi presi in esame in questo studio, la ricostruzione ha riguardato sia i dati mancanti già all'origine (perché non pubblicati) che quelli ritenuti poco attendibili e quindi scartati, in base ai controlli prima detti (casi assai più rari).
Per il procedimento di ricostruzione, che, a seconda della stazione considerata, ha riguardato i dati medi mensili di temperatura massima e minima e/o i totali mensili di precipitazioni, è stato preliminarmente effettuato il calcolo delle correlazioni tra tutte le possibili coppie di stazioni limitrofe, i cui valori fossero effettivamente disponibili e validi.
Nei casi in cui si è riscontrato un elevato grado di correlazione tra una stazione e almeno altre due vicine, è stata calcolata la regressione lineare semplice tra le coppie di valori, che ha permesso di ricostruire i pochi dati mancanti.
Una volta ricostruiti, questi sono stati inseriti, insieme agli altri già controllati, a formare l'archivio completo e definitivo, su cui sono state effettuate le elaborazioni climatologiche.
Malgrado questi procedimenti, per alcune stazioni non è stato comunque possibile ricomporre l'intero trentennio di riferimento, in quanto, per le serie che presentavano molti anni di dati mancanti, soprattutto se consecutivi, non è stato possibile ricostruirli.
La ricostruzione, peraltro, non ha comunque riguardato i dati giornalieri, in quanto risulta per essi assai più difficile e impreciso lo studio della correlazione.
L'analisi statistica effettuata nel presente lavoro è stata eseguita ricavando dai dati di temperatura e precipitazioni una serie di indici statistici (media aritmetica, mediana, quantili, coefficiente di variazione), di cui si darà breve cenno, in grado di rendere ricca di informazioni e notizie l'analisi stessa.
Una serie di osservazioni relative ad un determinato elemento meteorologico (es. temperatura), effettuate ad intervalli regolari di tempo, costituisce quella che viene chiamata *serie temporale* e rappresenta il punto di partenza dell'analisi statistica.

Alla serie temporale vengono solitamente applicati degli indici, alcuni analitici, altri sintetici, che forniscono informazioni più o meno dettagliate sulle caratteristiche di questa.
Il primo, ed anche il più comune indice sintetico, è la *media aritmetica*. Essa è la somma degli *n* valori assunti da ogni dato osservato, da cui è composta la popolazione, divisa per il numero complessivo delle osservazioni. La media racchiude quindi in un unico valore l'informazione riguardante una popolazione di dati.
Un altro indice sintetico è rappresentato dalla *mediana*; essa è quel valore che all'interno di una distribuzione ordinata di dati in ordine crescente occupa il posto centrale; in altre parole, è il valore che suddivide una distribuzione ordinata in due distribuzioni, che raccolgono ciascuna il 50% della distribuzione totale.
Va da sé che la capacità di informazione che possiede una media, sia essa media aritmetica, sia essa mediana, è piuttosto limitata. Nulla dicono riguardo ai vari elementi che compongono la distribuzione, né permettono di giungere ad una conoscenza completa della stessa.
La mediana è un indice più "robusto" rispetto alla media aritmetica, in quanto essa non risente dei valori estremi di una distribuzione (ossia il valore più basso e quello più elevato).
La media aritmetica, al contrario, è influenzata dai valori dei diversi termini della distribuzione: ha quindi una capacità di informazione più alta rispetto alla mediana, ma esprime in ogni caso un dato che è estremamente aggregato e quindi non in grado di caratterizzare bene una distribuzione. Vi sono, infatti, infinite distribuzioni, tutte diverse tra loro, per le quali la media può assumere il medesimo valore.
Per potere scegliere quale è il miglior indice, la media o la mediana, da adottare per rappresentare sinteticamente una distribuzione, bisogna conoscere bene la popolazione di dati che si vuole analizzare e il tipo di informazione che se ne intende ricavare.
Per l'analisi delle temperature, ad esempio, l'uso della media aritmetica serve bene a fornire un valore che sia la vera sintesi dell'intera popolazione di dati. Al contrario, per l'analisi delle precipitazioni, è preferibile utilizzare la mediana; questa, pur essendo un indice con una minore capacità informativa rispetto alla media, è tuttavia più adatta a rappresentare una distribuzione di valori di questo tipo, poiché, come già detto, non risulta influenzata dagli eventi estremi (precipitazioni troppo abbondanti o troppo scarse), che verificandosi assai raramente, andrebbero a pesare troppo sul reale andamento del fenomeno, falsando il valore finale dell'indice.
Le informazioni ricavate dall'uso degli indici sintetici, possono non essere sufficienti a caratterizzare una distribuzione di dati: occorre, quindi, adottare degli altri indici che siano in grado di esprimere la variabilità della distribuzione, cioè quanto i diversi elementi che la compongono si discostano dalla media e fra loro.
Tra i diversi indici di variabilità, il più usato, e anche quello adottato nel presente lavoro, è il *coefficiente di variazione*, dato dal rapporto percentuale tra lo scarto quadratico medio e la media, e si utilizza quando si vogliono mettere a confronto le misure di variabilità di popolazioni di dati che hanno medie differenti.
Oltre agli indici sintetici e agli indici di dispersione o variabilità, per fornire ulteriori indicazioni che servissero a caratterizzare meglio il clima è stata utilizzata l'analisi probabilistica, attraverso l'uso dei *quantili*. Può rivelarsi utile, per uno studio più approfondito di una distribuzione ordinata di dati, suddividere questa in un determinato numero di distribuzioni parziali, ciascuna delle quali può essere genericamente detta quantile. Il 1° quantile segna il limite tra la prima e la seconda distribuzione parziale, il 2° quantile segna il limite tra la seconda e la terza, e così via.
Tra i più usati vi sono i *quartili,* che dividono la distribuzione in quattro parti uguali, aventi ciascuna il 25% della popolazione totale. Nel presente lavoro sono stati utilizzati invece i *centili,* che suddividono la distribuzione in cento parti uguali, in particolare il 5°, il 10°, 25°, il 50° (mediana), il 75°, il 90° e il 95° percentile.
L'uso dei percentili nella statistica applicata alla climatologia serve ad individuare con quale probabilità si possa verificare un determinato evento. Ad esempio, con quale probabilità una determinata soglia termica possa essere superata, o che probabilità ci sia riguardo al verificarsi di determinati eventi piovosi.
Dire che il valore di temperatura del 5° percentile del mese di gennaio è 1,2 °C, equivale a dire che vi è il 5% di probabilità di avere nel mese di gennaio una temperatura inferiore o uguale a 1,2 °C, o, allo stesso modo, di avere il 95% di probabilità che questo valore venga superato.

Metodologia utilizzata per le elaborazioni puntuali (per stazione)

SEZIONE TEMPERATURA E CLIMOGRAMMI

Temperature medie mensili

Per ciascuna stazione, i dati sono presentati innanzitutto in una tabella riassuntiva di valori medi mensili di temperatura massima, minima e media.

Climogrammi di Peguy

Oltre che per tale tabella, i dati medi mensili sono stati utilizzati, assieme a quelli medi delle precipitazioni, per la realizzazione dei climogrammi di Peguy.
I climogrammi di Peguy riassumono sinteticamente le condizioni termo-pluviometriche delle diverse località considerate. Essi sono costruiti, appunto, a partire dai dati medi mensili di temperatura media e precipitazioni cumulate. Sulle ascisse è riportata la scala delle temperature (°C), mentre sulle ordinate quella delle precipitazioni (mm). Dall'unione dei 12 punti relativi a ciascun mese, si ottiene un poligono racchiudente un'area, la cui forma e dimensione rappresentano bene le caratteristiche climatiche di ciascuna stazione. Sul climogramma è anche riportata un'area triangolare di riferimento che, secondo Peguy, distingue una situazione di clima temperato (all'interno dell'area stessa), freddo, arido, caldo (all'esterno del triangolo, ad iniziare dalla parte in alto a sinistra del grafico, in senso antiorario). Il triangolo è costruito sulla base delle seguenti coordinate dei vertici: (0 °C, 0 mm); (23,4 °C, 40 mm); (15 °C, 200 mm). La posi-

zione dell'area poligonale, rispetto a quella triangolare di riferimento fornisce una rappresentazione immediata delle condizioni climatiche della stazione. Inoltre, dal confronto grafico delle aree poligonali delle varie stazioni risulta agevole e intuitivo lo studio comparato delle zone in cui sono ubicate le stazioni stesse.
Solo qualche esempio, per guidare la lettura dei climogrammi. Un'area poligonale sviluppata lungo l'asse delle ordinate rappresenta una stazione caratterizzata da evidenti differenze di precipitazioni totali mensili, fra i mesi autunno-invernali e quelli primaverili-estivi. Viceversa, un'area molto allungata nella direzione dell'asse delle *x* rappresenta una condizione climatica caratterizzata da elevate escursioni termiche annuali.
Due esempi di climogrammi per stazioni con caratteristiche molto diverse sono riportati in appendice (figg. 1 e 2).

Studio probabilistico mensile e decadico
In altre cinque distinte tabelle sono presentati i dati relativi allo studio probabilistico dei valori medi e assoluti mensili di temperatura massima, minima e media. In tal caso, oltre ai valori minimi e massimi, sono stati considerati i seguenti percentili: quinto (5°), venticinquesimo (25°), cinquantesimo (mediana) (50°), settantacinquesimo (75°) e novantacinquesimo (95°). In tal modo, come già detto nella parte generale, è possibile trarre maggiori informazioni dai dati elaborati, rispetto a quanto interpretabile attraverso i soli dati medi. Circa il significato dell'elaborazione probabilistica con il metodo dei quantili si rimanda alla parte metodologica generale.
Le stesse elaborazioni, sono state effettuate a livello decadico, presentando però, in tre ulteriori tabelle, delle soglie di probabilità leggermente diverse: anziché il 5° e il 95° percentile sono riportati il 10° e il 90° percentile.
Per ciascuna elaborazione probabilistica, sono stati anche calcolati i coefficienti di variazione (c.v.), tra tutti i valori delle serie storiche considerate. Tale coefficiente dà una misura della loro variabilità relativa, espressa in termini percentuali. Va precisato che il c.v. perde significato statistico quando la media è prossima a zero. In tali circostanze infatti, trovandosi quest'ultima al denominatore dell'espressione di calcolo, il c.v. tende a infinito. Pertanto, nei casi in cui nelle tabelle di presentazione dei dati si notano dei valori di c.v. molto alti, positivi o negativi (ad esempio, superiori a 100%), essi non rappresentano più una reale situazione fisica.

Studio probabilistico sulle temperature estreme giornaliere
In una tabella riassuntiva sono state poi presentate le elaborazioni relative ad uno studio su base giornaliera, riportante per ciascun mese, nonché a livello annuale, le probabilità del numero di giorni in cui le temperature abbiano raggiunto delle soglie estreme, considerate "a rischio" per molte specie vegetali coltivate: due relative a valori molto bassi (-3 °C e 0 °C) e due relative ad alte temperature (30 °C e 35 °C). I livelli di probabilità presentati sono gli stessi visti prima, a proposito delle elaborazioni medie decadiche: minimo del trentennio, 10°, 25°, 50° (mediana), 75° e 90° percentile e massimo del trentennio.
Una particolare elaborazione grafica è poi quella mirante a evidenziare graficamente, per ciascuna stazione studiata, i periodi, espressi in giorni, in cui gli anzidetti 4 valori soglia vengono raggiunti e quindi i corrispondenti periodi di presenza e assenza di rischio.
Ciò, in particolare, è stato realizzato fissando delle soglie di probabilità a livelli nettamente prudenziali: 99% (per le soglie di 0 °C e -3 °C) e 90% (per le due soglie di alte temperature). I livelli di rischio relativi al numero di anni non considerati sono stati quindi volutamente tenuti molto bassi: 1% degli anni, nel caso delle basse temperature, e 10% degli anni, per le alte temperature.
E' opportuno evidenziare che, soprattutto per le soglie minime, molta attenzione deve essere prestata nella lettura delle suddette elaborazioni tabulari e grafiche. Infatti, gran parte delle stazioni di rilevamento considerate sono ubicate presso siti urbani, caratterizzati in genere da più alti valori delle minime, rispetto al territorio circostante. Ciò è particolarmente evidente per le aree territoriali vallive e depresse, nelle quali si verificano degli addensamenti e dei ristagni di aria fredda, ben più evidenti rispetto alle aree collinari, in cui in genere ricadono molti centri urbani.
Se queste considerazioni valgono comunque per tutte le elaborazioni relative allo studio sulle temperature, tuttavia per gli estremi minimi esse assumono un maggiore e ulteriore significato applicativo.
Due esempi relativi a tale studio probabilistico sono riportati in appendice (figg. 5 e 6).

SEZIONE PRECIPITAZIONI
Probabilità di precipitazioni mensili
Per ogni stazione pluviometrica che presentava una serie trentennale completa, o ricostruibile come già detto nella parte metodologica generale, sono stati determinati i valori mensili di precipitazioni che non vengono superati a predeterminati livelli di probabilità, utilizzando anche in questo caso, il metodo dei centili. Oltre ai valori minimi e massimi, le soglie considerate sono quelle del 5%, 25%, 50%, 75% e 95%. I dati sono presentati in un'unica tabella riassuntiva, che comprende anche i valori del coefficiente di variazione. Esso, come già detto nella sezione Temperature, consente di valutare il grado di dispersione relativa dei dati della serie intorno alla media, anche in tal caso espressa in valori percentuali.
Sotto la tabella, i dati sono stati anche presentati in forma grafica. L'analisi dei diagrammi consente di ottenere agevolmente delle informazioni sulla variabilità delle precipitazioni nell'ambito di ogni mese: se infatti i punti relativi ai diversi livelli di probabilità, e quindi le relative spezzate che li congiungono, sono fra loro molto distanziati, significa che vi è una maggiore variabilità che non nel caso in cui essi siano ravvicinati.
Dalla lettura dell'ultimo livello di probabilità di non superamento inoltre, quello del 95%, si possono trarre indicazioni anche sui valori estremi verificatisi nelle varie stazioni e nei vari mesi.

Probabilità di precipitazioni decadiche
Anche per le precipitazioni decadiche è stato seguito lo stesso metodo di elaborazione. Tuttavia le soglie di probabilità scelte sono leggermente diverse da quelle adottate a livello mensile. Esse, oltre al minimo e al massimo, comprendo i seguenti percentili: 10°, 25°, 50° (mediana), 75° e 90°.

Precipitazioni di massima intensità
In una apposita tabella, raggruppando le stazioni per provincia, sono stati riportati i dati relativi alle precipitazioni di massima intensità. Le elaborazioni riguardano i dati annuali delle stazioni pluviometriche con strumenti registratori; per tale motivo le stazioni presenti in questa elaborazione sono molto meno numerose del totale regionale delle pluviometriche. Va pure considerato che, in tal caso, le serie storiche non sono ricostruibili con le procedure già viste e sono state quindi escluse da questa elaborazione tutte le stazioni che presentavano un numero insufficiente di anni di osservazione, cioè delle serie con molti "buchi".
Nelle colonne sono rappresentati i valori massimi e medi degli eventi estremi a 1 ora e 24 ore e i mesi in cui tali eventi si sono verificati. Nelle righe sono state invece riportate le stazioni presenti nell'area di studio.
Dall'analisi dei valori medi, è possibile effettuare un confronto territoriale e risalire alle caratteristiche climatiche riguardanti gli eventi temporaleschi, per le diverse aree in cui sono ubicate le stazioni. Si tratta pertanto di un'elaborazione tendente a visualizzare soprattutto un confronto spaziale. Oltre a ciò, si ha la possibilità di conoscere qual è il valore massimo raggiunto nell'intero periodo di osservazioni e quale il mese in cui si hanno maggiori probabilità che si verifichino eventi di precipitazioni molto intense. In quest'ultimo caso la statistica adottata è stata la moda: il valore che si presenta con maggiore frequenza.

Giorni piovosi
In climatologia, in genere, per giorno piovoso si intende un giorno in cui le precipitazioni sono superiori o uguali a 1 mm. Con tale criterio sono quindi state effettuate tutte le elaborazioni.
Per quanto riguarda lo studio probabilistico, così come visto sopra per le precipitazioni decadiche, anche in questo caso è stato seguito lo stesso metodo di elaborazione, con le medesime soglie di probabilità.

SEZIONE BILANCIO IDRICO DEI SUOLI SECONDO IL METODO THORNTHWAITE-MATHER
Uno dei fattori limitanti per l'agricoltura meridionale è rappresentato dalla disponibilità idrica. Per evitare carenze e sprechi della risorsa acqua è pertanto essenziale conoscere l'evoluzione del contenuto idrico dei suoli, in rapporto alle caratteristiche degli stessi e alle condizioni climatiche.
Specialmente negli ambienti di pianura e di bassa collina, dove il territorio è maggiormente utilizzato a fini agricoli, è quindi molto utile prevedere in che misura il suolo sarà in grado di rifornire le colture sotto l'aspetto idrico, al fine di valutarne le potenzialità.
Nel suolo, sia esso naturale o coltivato, il contenuto di acqua disponibile per i vegetali è intimamente legato alle caratteristiche fisiche dello stesso (tessitura e struttura) e alle condizioni climatiche dell'area sulla quale tale suolo si è evoluto.
La disponibilità di dati climatici, pedologici e colturali consente lo studio delle condizioni idriche dei suoli e rappresenta uno degli strumenti più validi per un corretto e razionale uso della risorsa acqua in campo agronomico e territoriale, indicando in particolare la presenza di zone più o meno deficitarie dal punto di vista della disponibilità idrica, e permettendo, nel contempo, di classificare i territori a differente marginalità di tipo pedoclimatico.
Tuttavia, se da un lato la disponibilità di dati climatici è già sufficiente per le applicazioni di bilancio idrico, dall'altro lato i dati pedologici sono spesso carenti, oppure disponibili a scale non adeguate o, ancora, per la loro disponibilità sono richiesti tempi lunghi.
Per ovviare a questo problema, in questo studio è stato considerato un suolo-tipo con caratteristiche fisiche medie (vedi tabella sotto), caratterizzato da una capacità di riserva idrica utile di 100 mm, puntando piuttosto la nostra attenzione sulla domanda evaporativa dell'atmosfera.
Occorre dunque tenere presente che i suoli più profondi e/o dotati di frazioni tessiturali più fini (limo, argilla) presentano valori di deficit idrico meno accentuati e possono nel contempo assicurare una riserva idrica maggiore nei riguardi dei vegetali, per cui il decorso del deficit idrico durante l'anno varia, in particolare, in relazione al valore della riserva idrica utile del suolo (ST), all'intensità della evapotraspirazione potenziale (PE) ed alla consistenza delle precipitazioni.
Di seguito, saranno indicate le metodologie attraverso le quali è possibile giungere alla formulazione di un bilancio idrico semplificato.

L'evapotraspirazione ed il bilancio idrico del suolo, secondo Thornthwaite-Mather.
Lo studio del bilancio idrico dei suoli comporta comunque, necessariamente, delle semplificazioni di tutti i fenomeni fisici e i processi fisiologici che interagiscono nel sistema terreno-pianta-bassa atmosfera.
Tali considerazioni conducono alla scelta, ad esempio, di una metodologia che utilizzi delle relazioni empiriche per il calcolo del bilancio idrico, in particolare per quanto riguarda l'evapotraspirazione potenziale (ETP).
Numerose sono le formulazioni empiriche, per la stima calcolo della ETP, mediante la correlazione con alcune grandezze meteorologiche (radiazione solare, umidità dell'aria, vento, temperatura dell'aria, ecc.). Disponendo tuttavia, come accade per la maggior parte del territorio regionale, di serie storiche complete di dati relativi ad una rete di stazioni di densità accettabile, solo per la temperatura dell'aria e le precipitazioni, la scelta ricade su quelle equazioni che utilizzano soltanto queste due grandezze, quale ad esempio, nel nostro caso, quella di Thornthwaite (1957).
Il bilancio idrico del suolo secondo Thornthwaite è stato indicato come il metodo standard per il calcolo del regime idrico dei suoli a livello tassonomico, dalla Soil Taxo-

nomy, del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti d'America (U.S.D.A.) (1975).
La vasta raccolta di dati ottenuti dall'Autore a livello mondiale, ha permesso inoltre di addivenire alla stesura di un vero e proprio sistema climatico noto con il suo nome.
Di seguito, verranno forniti alcuni elementi fondamentali sulla metodologia utilizzata da Thornthwaite, per giungere alla definizione del bilancio idrico.
Lo schema di calcolo è costituito da una matrice (vedi tabella sotto), in cui nelle colonne sono riportati i mesi dell'anno e alcuni totali annui, mentre nelle righe, in sequenza, una serie di parametri che saranno descritti in dettaglio nelle pagine successive.

Schema di calcolo del bilancio idrico,
con il metodo Thornthwaite-Mather (da Ciavatta, Vianello, mod.).

	MESI												ANNO
PARAMETRO	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	
T													
I													
P													
PE													
P-PE													
AWL													
ST													
CST													
AE													
D													
S													

Dove:
T (Temperature) = temperatura media mensile (°C).
I (Index of heat) = indice di calore annuale. Questo indice viene calcolato come sommatoria dei dodici indici di calore mensili *i*, in funzione di ciascun valore della temperatura media mensile:

$$I = \sum_{1}^{12} i$$

l'indice *i*, per ciascun mese, è così calcolato:

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

PE (Potential Evapotranspiration) = evapotraspirazione potenziale (ETP) (mm). Il calcolo della PE mensile si effettua in tre fasi successive:
1) calcolo dell'indice globale di calore I, prima descritto;
2) calcolo preliminare della evapotraspirazione potenziale provvisoria (PE_P), in funzione dell'indice I

$$PE_P = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a$$

dove:

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49$$

Tale valore, secondo lo stesso Autore, rappresenta l'evapotraspirazione potenziale mensile provvisoria (PE_P), perché calcolato per una giornata con 12 ore di illuminazione; PE è invece tanto maggiore, a parità di temperatura, quanto più lunghi sono i giorni. Essa va quindi corretta, introducendo un coefficiente (*pi*) che tiene conto della latitudine in cui si trova la stazione e del mese, considerando quindi l'effetto dell'insolazione teorica nella località considerata e nei diversi periodi dell'anno; in tal modo avremo:
3) calcolo dell'evapotraspirazione potenziale finale (PE): $PE = (PE_P) \times pi$
I valori di *pi* si possono calcolare, per le diverse latitudini e per ciascun mese, attraverso il rapporto fra le ore teoriche di insolazione (eliofania assoluta) e la metà delle ore giornaliere (12). Nella tabella sotto sono stati riportati i 12 valori di *pi*, per alcuni valori di latitudine nord.

Valori del coefficiente di correzione pi, per latitudine e per mese.

	Latitudine nord				
Mese	36°	36,5°	37°	37,5°	38°
Gennaio	0,85	0,85	0,85	0,84	0,84
Febbraio	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91
Marzo	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01
Aprile	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
Maggio	1,19	1,2	1,2	1,2	1,21
Giugno	1,23	1,23	1,23	1,24	1,24
Luglio	1,21	1,21	1,21	1,22	1,22
Agosto	1,14	1,14	1,14	1,14	1,15
Settembre	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Ottobre	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93
Novembre	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85
Dicembre	0,83	0,83	0,82	0,82	0,81

P (*Precipitation*) = precipitazioni medie mensili (mm). Sono riportati i valori delle precipitazioni mensili.
P-PE = differenza fra precipitazioni mensili ed evapotraspirazione potenziale. Mette in rilievo i mesi in cui le precipitazioni sono in eccesso e quelli in cui, invece, vi è un difetto.
AWL (*Accumulated Water Loss*) = perdita d'acqua cumulata. Al fine di valutare meglio gli effetti sulla riserva idrica del terreno, occorre sommare le perdite periodiche di acqua dovute all'evapotraspirazione.
ST (*Storage*) = riserva idrica utile del suolo. Rimane immutata fino a quando le precipitazioni superano l'evapotraspirazione potenziale, poi comincia a diminuire in modo esponenziale. A inizio autunno, quando le precipitazioni tornano a superare PE, ricomincia la fase di ricarica della riserva (R).
CST *(Changes in Storage)* **=** variazioni della riserva idrica utile del suolo. Attraverso alcuni calcoli, è possibile stabilire la percentuale di acqua da togliere alla ST, in funzione del valore di AWL mensile.
AE (*Actual Evapotranspiration*) = evapotraspirazione reale o effettiva (ETE). Il calcolo dell'AE si effettua seguendo alcuni semplici principi:
a) quando P è maggiore di PE e ST è integra, AE è uguale a PE;
b) nei mesi in cui P è inferiore a PE, le piante attingono anche dal terreno per cui AE sarà uguale alla somma delle precipitazioni e della variazione di riserva (P+CST).
D (*Deficit*) = deficit idrico. Rappresenta la carenza idrica ed è calcolato effettuando la differenza fra l'evapotraspirazione potenziale e quella reale (PE-AE).
S (*Surplus*) = eccedenza idrica. Se la ST è integra, l'eccesso di precipitazioni è computato come eccedenza e soggetto a defluire, come riportato in alcuni esempi:
a) se P è superiore a PE e ST è integra: S = (P-PE);
b) se P è superiore a PE e ST non è ancora integra: S = 0, finché ST non sia ricostituita integralmente.
c) se P è inferiore a PE: S = 0.
I risultati del bilancio idrico del suolo, elaborati con il metodo Thornthwaite-Mather, per ciascuna stazione termo-

pluviometrica che presentava una serie storica idonea, sono presentati in due tipologie di tabelle, riferibili distintamente all'analisi a livello annuale e mensile.
Anche in tal caso è stata scelta un'elaborazione di tipo probabilistico, utilizzando il metodo dei quantili, come già visto per le temperature e le precipitazioni. Le tabelle comprendono anche il coefficiente di variazione.
Nella parte sottostante alla tabella dei valori annui, viene presentata anche un'elaborazione grafica sull'evoluzione mensile dei principali parametri del bilancio, in modo da rendere più intuitiva l' interpretazione dei dati.
In appendice, sono riportati due grafici di esempio (figg. 3 e 4), relativi a due stazioni con caratteristiche climatiche molto diverse

SEZIONE INDICI CLIMATICI

Gli indici climatici sono delle particolari elaborazioni con cui si cercano di riassumere, in uno o pochi numeri e/o simboli, le condizioni climatiche di una località, utilizzando soltanto alcune principali variabili meteorologiche (in genere, temperatura dell'aria e precipitazioni). Tra le numerose possibili classificazioni climatiche mediante l'uso di indici sintetici, proposte dagli studiosi di climatologia e geografia nel corso degli anni, in questo studio ne vengono considerate quattro, caratterizzate da un crescente livello di complessità: Pluviofattore di Lang, Indice di aridità di De Martonne, Quoziente pluviometrico di Emberger, Indice globale di umidità di Thornthwaite.

Classificazione di Lang: Pluviofattore o Regenfaktor (R).

La classificazione di Lang è la più semplice. Essa si basa sul rapporto fra il valore delle precipitazioni medie annue (mm) e quello della temperatura media annua (°C). La formula è pertanto la seguente:

$$R = \frac{P}{T}$$

dove:
P = precipitazioni medie annue (mm);
T = temperatura media annua (°C).

Sono state definite 5 classi climatiche, di seguito presentate nella tabella seguente:

Pluviofattore di Lang (R)

Clima	R
Umido	>160
Temperato umido	160÷100
Temperato caldo	100÷60
Semiarido	60÷40
Steppa	<40

Classificazione di De Martonne: Indice di aridità (Ia).

Anche per quanto riguarda la classificazione di De Martonne, le grandezze considerate sono le precipitazioni medie annue (mm) e la temperatura media annua (°C). La formula proposta dall'Autore tende però a ridurre alcuni inconvenienti che si verificavano applicando la formula di Lang nelle località caratterizzate da clima freddo. Infatti, in tali situazioni, con temperature medie annue prossime a 0 °C si hanno valori troppo elevati, mentre per valori inferiori a 0 °C si ottengono dei valori negativi del pluviofattore di Lang.
Pertanto, la formula proposta da De Martonne è la seguente:

$$Ia = \frac{P}{T + 10}$$

dove:
P = precipitazioni medie annue (mm);
T = temperatura media annua (°C).

Anche in tal caso, l'Autore ha definito 5 classi climatiche, come in tabella seguente:

Indice di aridità di De Martonne (Ia)

CLIMA	Ia
Umido	>40
Temperato umido	40÷30
Temperato caldo	30÷20
Semiarido	20÷10
Steppa	10÷5

Classificazione di Emberger: Quoziente pluviometrico (Q).

Le grandezze considerate in questa classificazione, oltre alle precipitazioni medie annue (mm), sono: la media mensile delle temperature massime nel mese più caldo e la media mensile delle temperature minime nel mese più freddo; entrambi i valori sono espressi in gradi Celsius (°C).
La formula proposta dall'Autore è la seguente:

$$Q = \frac{P}{\left(M^2 - m^2\right)} \cdot 100$$

dove:
P = precipitazioni medie annue (mm);
M = media mensile delle temperature massime nel mese più caldo;
m = media mensile delle temperature minime nel mese più freddo.
Sono state definite 4 classi climatiche, qui presentate nella tabella che segue:

Quoziente pluviometrico di Emberger (Q)

Clima	Q
Umido	>90
Subumido	90÷50
Semiarido	50÷30
Arido	<30

Classificazione Di Thornthwaite: Indice Globale di Umidità (Im).

La classificazione di Thornthwaite è un po' più complessa e parte da presupposti più ampi, legati al concetto di evapotraspirazione
Le grandezze necessarie sono: temperatura media mensile e precipitazioni annue.

L'equazione che conduce al calcolo dell'indice è la seguente:

$$Im = \frac{P - ETP}{ETP} \cdot 100$$

dove:
P = precipitazioni medie annue (mm)
ETP = evapotraspirazione potenziale media annua (mm), derivante dalla somma dei 12 valori dell'ETP media mensile.

Per il calcolo dell'ETP media mensile si rimanda a quanto detto in precedenza, relativamente alle elaborazioni del bilancio idrico dei suoli, secondo il metodo Thornthwaite-Mather.

Sono state definite 6 classi climatiche, come riportato in tabella seguente:

Indice globale di umidità di Thornthwaite (Im)

Clima	Im
Iperumido	>100
Umido	100÷20
Subumido-umido	20÷0
Asciutto-subumido	0÷-33
Semiarido	-33÷-67
Arido	-67÷-100

Indice bioclimatico di Rivas-Martinez
La classificazione bioclimatica di Rivas-Martinez, può essere considerata come la risultante dell'interazione di due classificazioni proposte dallo stesso Autore: il termoclima e l'ombroclima.
E' prioritario calcolare innanzitutto l'indice ombrotermico estivo (I_{OV}) per stabilire in quale regione macroclimatica ricade l'area territoriale di nostro interesse. L'indice ombrotermico estivo è dato dal rapporto fra la somma delle precipitazioni mensili nei tre mesi estivi (giugno, luglio e agosto) e la somma delle temperature medie mensili per lo stesso periodo:

$$IOV = \frac{\sum Pgiu + Plug + Pago}{\sum Tmedgiu + Tmedlug + Tmedago}$$

Per quanto riguarda la regione mediterranea, caratterizzata da un $I_{OV} < 1,5$ e all'interno della quale ricade quasi tutto il territorio regionale, la classificazione termoclimatica definisce cinque classi principali, ciascuna delle quali è denominata "Piano", che a loro volta possono essere articolate in sottoclassi di maggiore dettaglio, definite dall'Autore con il nome di "Orizzonti".
Anche la subclassificazione ombroclimatica per la regione mediterranea presenta una estesa articolazione in classi, in funzione delle precipitazioni totali medie annue.
Entrambe le classificazioni sono di seguito riportate.

Termotipo (valori di It)

Piano		Orizzonte		
		Superiore	Medio	Inferiore
Crioromediterraneo	-100 -10	-100 -55	-	-55 -10
Oromediterraneo	-10 70	-10 30	-	30 70
Supramediterraneo	70 210	70 120	120 163	163 210
Mesomediterraneo	210 350	210 256	256 303	303 350
Termomediterraneo	350 450	350 400	-	400 450
Inframediterraneo	450 500	-	-	-

L'indice It si ricava applicando la seguente equazione:
It = (T + M + m) 10
dove:
T = temperatura media annua
M = temperatura media delle massime nel mese più freddo
m = temperatura media delle minime nel mese più freddo

Ombrotipo

Ombrotipo	Precipitazioni annue (mm)
Ultra iperumido	> 2300
Iperumido superiore	1950 2300
Iperumido inferiore	1600 1950
Umido superiore	1300 1600
Umido inferiore	1000 1300
Subumido superiore	800 1000
Subumido inferiore	600 800
Secco superiore	450 600
Secco inferiore	350 450
Semiarido superiore	275 350
Semiarido inferiore	200 275
Arido superiore	150 200
Arido inferiore	100 150

In questo lavoro, anche per facilitare la rappresentazione e la lettura della carta bioclimatica, riguardo alla componente termoclimatica si è ritenuto opportuno fare riferimento alla classificazione semplificata, considerando solo i piani del termoclima, omettendo quindi la distinzione nei diversi orizzonti.
La componente ombroclimatica, i cui dettagli tendono ad assumere maggiore significato nelle aree a clima tendenzialmente semiarido, è stata invece presentata per intero, ad eccezione della versione stampata su supporto cartaceo in forma di carta ancillare, dove anch'essa viene presentata in chiave sintetica.

Metodologia utilizzata per le elaborazioni cartografiche

Per passare da una serie di dati puntuali a una distribuzione continua nello spazio, attraverso una rappresentazione cartografica dell'andamento delle grandezze meteo-climatiche si possono impiegare diversi metodi. Tra i più diffusi si ricordano ad esempio quello della media aritmetica (il più semplice), della media mobile pesata, in cui il peso è in genere l'inverso della distanza elevato a potenza, le tecniche delle isoiete e dei topoieti. Negli ultimi anni, anche in climatologia si fa ricorso sempre più spesso ai metodi geostatistici, che oltre all'interpolazione dei i dati

puntuali, mediante l'impiego di appropriati algoritmi di calcolo, permettono pure la possibilità di un'analisi statistica, sia a monte che a valle del processo di spazializzazione. In proposito, il metodo del Kriging sembra presentare buone possibilità applicative in climatologia.
I diversi metodi utilizzati in questo studio sono descritti di seguito, nelle specifiche sezioni riguardanti le diverse elaborazioni cartografiche.
E' innanzitutto da precisare che tutte le elaborazioni sono state effettuate pensando ad una restituzione cartografica alla scala 1:250000, che appare quella più idonea rispetto alla coerenza con un dataset climatico che consente un'elaborazione spaziale che non può andare a livelli di dettaglio oltre quelli della mesoscala. Inoltre, è qui opportuno richiamare che le elaborazioni anzidette sono state effettuate utilizzando alcune funzioni offerte dagli strumenti GIS (sistemi informativi geografici). Nel nostro caso sono stati utilizzati diversi software commerciali, alcuni impiegati per le analisi preliminari, alcuni per particolari funzioni complesse di analisi e calcolo, altri per la fase di realizzazione finale.
Infine è opportuno evidenziare che tutte le carte derivate (escursioni termiche, evapotraspirazione potenziale, indici climatici) sono state ottenute attraverso l'esecuzione dell'algoritmo di calcolo sui dati cartografici di base (file grid di temperatura e precipitazioni) e non attraverso l'interpolazione dei valori puntuali dei diversi indici.

CARTE DI TEMPERATURA

La carte delle temperature sono state ottenute a partire dal noto concetto di **gradiente termico verticale** medio dell'atmosfera, in prossimità della superficie terrestre.
In pratica, sulla base della conoscenza di tale fenomeno, si è indagato sull'entità del **coefficiente di correlazione** fra la temperatura media annua rilevata presso tutte le stazioni oggetto del presente studio e la quota altimetrica alla quale le stesse sono ubicate. Stesso discorso è stato poi fatto a livello mensile e decadico. Da tale analisi è risultata una elevata correlazione negativa fra le due variabili, con qualche eccezione per le massime estive, che ha consentito di applicare con una buona affidabilità il metodo della regressione lineare semplice, al fine di stimare il gradiente termico verticale.
A partire dai valori di gradiente termico verticale, e impiegando il DEM (Digital Elevation Model), Modello Digitale delle Elevazioni, prodotto qualche anno fa dall'Assessorato Regionale dei Beni Culturali e Ambientali e appositamente fornitoci per tale applicazione, si è quindi stimato il valore della temperatura su tutto il territorio regionale, attraverso i seguenti passaggi metodologici:
- riduzione sul livello del mare dei valori di temperatura delle singole stazioni;
- produzione delle carte intermedie, attraverso un procedimento di spazializzazione orizzontale, utilizzando il metodo "*spline*" quale interpolatore;
- realizzazione delle carte finali, applicando, per ciascuna carta intermedia, lo specifico gradiente termico verticale e la differenza di quota tra le celle del DEM e quelle delle carte intermedie (considerate a quota 0 m s.l.m.).

I valori stimati attraverso tali metodi e rappresentati dalle varie carte di temperatura sembrano rappresentare bene la reale distribuzione territoriale dei diversi aspetti del parametro, se confrontati con i dati elaborati presso le stazioni di rilevamento.
Tutte le carte fanno riferimento ad una legenda unica, che attraverso passaggi cromatici graduali rappresenta i valori di temperatura compresi in un range che va da -13 °C a 34 °C . In tal modo, un colore rappresenterà sempre, per qualsiasi carta, una determinata classe di valori. In particolare, l'intervallo delle classi è di 2 °C per tutto il campo di variabilità, ad eccezione del *range* che va da -4 °C a -13 °C , per il quale è stata definita una sola classe, stante la limitata estensione territoriale di tali valori, concentrati in pratica esclusivamente alle sommità dell'Etna.
In appendice (fig. 7) è riportata una versione ridotta della carta delle temperature medie annue.

CARTE DI PRECIPITAZIONI

A differenza del metodo seguito per le temperature, per la realizzazione delle carte di precipitazioni è stata effettuata soltanto una spazializzazione di tipo orizzontale. Infatti, per tale variabile meteorologica non è facile individuare un omogeneo e generale andamento dei parametri di correlazione spaziale, ad esempio rispetto alla quota altimetrica, così come avviene invece per le temperature. Ciò, in relazione all'esistenza di una situazione territoriale molto diversificata, soprattutto, ma non solo, relativamente all'orografia.
Il metodo di interpolazione utilizzato è stato quello dello "***spline***". Tale metodo è basato su una funzione matematica che minimizza la curvatura dell'intera superficie ideale che passa esattamente per i diversi punti di osservazione, con totale rispetto, nel nostro caso, dei valori rilevati presso le singole stazioni.
Tale metodo, molto diverso concettualmente dai metodi geostatistici, quale ad esempio il Kriging, fornisce dei buoni risultati in termini di rappresentazione delle superfici interpolate, paragonabili o addirittura sovrapponibili a quelle ottenute con lo stesso Kriging. Quest'ultimo metodo, d'altronde, spesso usato nelle nostre elaborazioni e impiegato specificamente nella prima edizione dell'"Atlante", fornisce delle informazioni aggiuntive, potenzialmente interessanti, circa le mappe di distribuzione degli errori e della deviazione standard delle variabili interpolate. Tuttavia, soprattutto per l'interpolazione spaziale di variabili per le quali si dispone di una serie di punti di osservazione caratterizzata da una densità territoriale molto bassa (es. 179 punti di osservazione, sull'intero territorio regionale, come nel nostro caso), i suddetti vantaggi diventano secondari, al punto, ripetiamo, da ottenere uguali risultati finali, ricorrendo ad interpolatori più semplici, dal punto di vista della struttura statistica, qual'è appunto lo *spline*.
I risultati ottenuti, infatti, sembrano rappresentare bene il reale andamento territoriale della variabile meteorologica in questione, sia rispetto al confronto con i valori puntuali elaborati per le 179 stazioni pluviometriche, sia nei confronti della diffusa conoscenza del territorio regionale, ancorché essenzialmente basata sull'esperienza diretta.

Carta delle precipitazioni annue
La rappresentazione dei dati interpolati è stata effettuata utilizzando un'unica legenda, nella quale l'intervallo tra le classi ha un passo di 100 mm, nel *range* che va da 100 a 800 mm/anno, e di 200 mm, per il range da 800 a 2600 mm/anno.
Contestualmente alla carta annuale viene visualizzata una rappresentazione grafica a istogrammi della distribuzione mensile delle precipitazioni (in percentuale rispetto al totale annuale). I tre diagrammi visualizzati derivano da un'analisi preliminare di tale distribuzione mensile, rispetto alle 179 stazioni elaborate, che ha permesso di distinguere e raggruppare 3 diverse situazioni territoriali relativamente omogenee, caratterizzate da distribuzioni mensili leggermente diverse.
Nella fig. 8, in appendice, è riportata la carta delle precipitazioni medie annue (mediana) insieme ai tre grafici di distribuzione mensile delle stesse.

Carte delle precipitazioni mensili
Per le carte mensili, la legenda adottata presenta 13 classi, che vanno da 0 mm a 160 mm. Da 0 mm a 20 mm l'intervallo è di 5 mm, da 20 mm a 40 mm, l'intervallo è di 10 mm, mentre per le restanti classi troviamo un intervallo di 20 mm.

Carte delle precipitazioni decadiche
La legenda delle carte decadiche presenta 9 classi, che vanno da 0 mm a 70 mm. Da 0 mm a 20 mm l'intervallo è di 5 mm, da 20 mm a 70 mm, l'intervallo è di 10 mm.

CARTE DEI GIORNI PIOVOSI
Così come per le precipitazioni, per la spazializzazione dei giorni piovosi è stato utilizzato il metodo dello ***spline***.

Carta annuale dei giorni piovosi
La legenda della carta annuale presenta 7 classi, che vanno da 30 a 100 giorni piovosi, con un intervallo tra le classi di 10 giorni piovosi.

Carte mensili dei giorni piovosi
La legenda delle carte mensili presenta 8 classi, che vanno da 0 a 14 giorni piovosi, con un intervallo tra le classi di 2 giorni piovosi.

Carte decadiche dei giorni piovosi
La legenda delle carte decadiche presenta 8 classi, che vanno da 0 a 7 giorni piovosi, con un intervallo tra le classi di 1 giorno piovoso.

CARTE DERIVATE
Le carte derivate sono state ottenute attraverso una rielaborazione delle diverse carte di base: temperatura e precipitazioni. Queste sono state pertanto utilizzate come dati cartografici di input, per ricavare le diverse elaborazioni climatiche, impiegando gli opportuni strumenti GIS e gli algoritmi di calcolo specifici.
É quindi da sottolineare, come sopra già accennato, che alla base di queste carte vi è un calcolo effettuato direttamente sulla componente cartografica, in formato *grid* (griglia di punti), e non un processo di interpolazione di dati elaborati a livello puntuale, cioè sul singolo sito di rilevamento.
L'esempio più semplice è riportato di seguito, nella descrizione della prima delle carte derivate qui elencate.
Lo stesso procedimento è stato utilizzato per tutte le altre, utilizzando le formule di base descritte in altre parti della guida ipertestuale, alle quali si rimanda.

Carta delle escursioni termiche medie annue
La carta delle escursioni termiche medie annue è stata ricavata effettuando la differenza fra i valori in formato *grid* della carta delle temperature medie del mese di luglio (in genere il mese più caldo) e della carta delle temperature medie del mese di gennaio (il mese più freddo in quasi tutte le stazioni). Tale carta non è stata quindi ottenuta interpolando i dati di escursione termica media annua elaborati per singola stazione, peraltro già presenti in apposite tabelle della pubblicazione "Climatologia della Sicilia".

Carte decadiche delle sommatorie termiche in base 10
I **gradi giorno** (GG) rappresentano un indice della disponibilità di energia termica nell'ambiente, visto in funzione delle esigenze vitali di sviluppo e crescita delle piante. Per tale ragione, in linguaggio anglosassone si utilizza la terminologia ***growing degree days*** (GDD). Il presupposto di base di tale indice parte dal concetto di *optimum* termico di sviluppo e crescita delle diverse specie vegetali, che ricade comunque entro un determinato intervallo di temperatura, costituito dalle soglie termiche massima e minima. Molti studi hanno evidenziato soprattutto il ruolo di quest'ultima, la soglia termica minima di sviluppo, che viene considerato il limite inferiore, al di sotto del quale il ciclo vitale rallenta fortemente o si arresta. Sulla soglia superiore, invece, i diversi studi condotti finora non hanno consentito di avere risposte univoche. Così, alcuni autori la considerano ininfluente, altri la considerano alla stessa stregua della soglia minima, altri ancora la sottraggono nelle operazioni di calcolo, in quanto al di là di tale soglia i processi vitali non solo possono essere rallentati o arrestati, ma addirittura depressi.
In questo lavoro, che affronta in chiave generale lo studio climatologico dell'intero territorio regionale, si è adottato il metodo più diffuso, che considera solo la soglia minima quale fattore limitante; nella fattispecie, è stata considerata la soglia minima che accomuna la gran parte delle specie vegetali coltivate (specie agrarie), cioè quella di 10 °C.
Il calcolo dei gradi giorno viene effettuato in tal caso sottraendo al valore della temperatura media giornaliera (in genere, rappresentato ancora oggi, universalmente, dalla semisomma della massima e della minima giornaliera) il valore della soglia termica minima di sviluppo, cioè la costante di 10 °C. Si ottengono così i gradi di temperatura utili per la crescita di quelle specie che hanno come limite termico inferiore di sviluppo la soglia di 10 °C, cioè, appunto, i gradi giorno (GG). I valori giornalieri così ottenuti vengono poi sommati progressivamente, lungo l'arco dell'anno, a partire da date convenzionali (in genere il

primo gennaio) o da specifiche date legate agli stadi fenologici (fasi di sviluppo) delle piante.
Nel nostro caso, che rappresenta, diciamo ancora, il più generale, le sommatorie termiche sono state cumulate a partire dalla data del primo gennaio. Per cui, ad esempio, la carta di sommatoria termica della seconda decade di settembre rappresenta la distribuzione territoriale della sommatoria GG, dal 1 gennaio al 20 settembre. E così via.
Le 36 carte decadiche delle sommatorie termiche cumulate sono state ottenute a partire dalle carte decadiche di temperatura media. A ciascuna di queste ultime carte, attraverso un procedimento di calcolo su *grid*, è stato innanzitutto sottratto il valore della costante (nel nostro caso 10 °C), ottenendo le 36 carte decadiche di sommatoria termica. Le carte finali di sommatoria termica cumulata sono state infine ottenute sommando a ciascuna carta di sommatoria termica i valori della della decade precedente.

CARTE DI EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE

Carte di evapotraspirazione potenziale mensile
Le 12 carte sono state realizzate applicando, in formato grid, utilizzando il software GIS, il metodo e l'algoritmo proposto da Thornthwaite, qui descritto precedentemente, nella parte relativa alle "Elaborazioni puntuali".
Carta dell'evapotraspirazione potenziale annua
Tale carta è stata ottenuta effettuando la somma dei valori in formato grid relativi alle 12 carte mensili appena dette.

CARTE DEGLI INDICI CLIMATICI

Le 5 carte degli indici climatici sono state realizzate applicando, in formato grid, utilizzando il software GIS, i metodi e gli algoritmi proposti dai diversi autori e qui descritti precedentemente.
La fig. 9, in appendice, rappresenta un esempio delle diverse carte degli indici climatici.

Uso dell' Atlante

L'"Atlante climatologico della Sicilia" può essere utilizzato quale strumento per conoscere le caratteristiche climatiche del territorio regionale, secondo un approccio di studio basato su dati mensili e decadici.
L'utente, in funzione delle proprie esigenze, può condurre la propria analisi con percorsi diversi, attraverso le varie parti che compongono l'Atlante e che concorrono ad articolare, approfondire e definire meglio le caratteristiche climatiche di un luogo, di un sito o di area più o meno vasta.
La rappresentazione cartografica della distribuzione spaziale delle variabili climatiche è stata realizzata sia utilizzando il classico supporto cartaceo (Carta climatica della Sicilia), sia attraverso il più moderno e attuale supporto magnetico (CD-ROM).
La Carta climatica della Sicilia consiste in diversi tematismi, alcuni dei quali alla scala 1:250000 (temperatura e precipitazioni medie annue) altri, in forma di carte ancillari (di accompagnamento alla principale), alla scala 1:1500000 (quinto, venticinquesimo, cinquantesimo, settantacinquesimo e novantacinquesimo percentile delle precipitazioni totali annue, temperatura media delle minime nel mese più freddo, media delle massime nel mese più caldo, evapotraspirazione potenziale media annua e alcuni indici climatici).
L'Atlante climatologico su CD-ROM, oltre a comprendere tutte le rappresentazioni cartografiche ora dette, contiene ulteriori, numerose elaborazioni (altri indici climatici, distribuzione spaziale dei valori mensili e decadici di temperatura, precipitazioni, evapotraspirazione potenziale, ecc.).
Il CD-ROM è però anche un database interrogabile e consultabile in maniera interattiva, comprendente tutti i dati mensili di base già analizzati, validati e in parte ricostruiti con appropriate procedure statistiche e sui quali sono state effettuate le elaborazioni climatologiche di sintesi. L'interrogazione può essere effettuata, attraverso delle apposite query già definite, sia a livello temporale che spaziale.
Scelta la stazione che interessa, tra quelle rappresentate sul territorio regionale e attraverso un percorso guidato, la consultazione "storica" consente di estrarre i dati sulla base di un intervallo temporale che può andare da un singolo mese all'intero trentennio (in ogni caso a scansione mensile).
L'analisi, o la consultazione, di tipo spaziale, consente invece l'interrogazione del database secondo un altro criterio. In tal caso, scelta la provincia, o una particolare altra area di interesse dell'utente, su cui effettuare l'interrogazione, può essere verificato un particolare "evento" meteorologico (anche in tal caso, comunque, il passo minimo è sempre quello mensile) su più stazioni meteorologiche: ciò può risultare utile, ad esempio, per capire cosa è successo in uno stesso periodo di tempo (da un mese ad un anno), sui diversi siti di rilevamento di una porzione circoscritta di territorio.
Infine il CD-ROM contiene tutte le elaborazioni già pubblicate su supporto cartaceo presenti sui volumi "Climatologia della Sicilia", rappresentate dai numerosissimi dati di sintesi, sia in forma tabulare che grafica, per singola stazione di rilevamento e numerose nuove elaborazioni su base giornaliera, tra cui la già citata analisi degli eventi termici estremi.
Il programma informatico che sta alla base dell'Atlante su CD-ROM è totalmente interattivo e di semplice utilizzo per la consultazione dei dati e delle elaborazioni ottenute con l'applicazione di modelli di analisi geografica. Esso è utilizzabile direttamente da CD-ROM e non richiede alcun software specifico di base.
Secondo passaggi graduali, si potranno quindi conoscere sia i dati medi, più generici, sia i dati dello studio probabilistico, che consentono invece un maggiore dettaglio di analisi.
Un utile suggerimento potrebbe però essere di partire dalle rappresentazioni cartografiche che, attraverso la visualizzazione di dati continui nello spazio, permettono di scegliere, con un criterio di similitudine, la stazione che meglio riesce a rappresentare l'area di interesse dell'utente.
Infatti, dall'analisi delle carte delle temperature (sia annuali che mensili), delle precipitazioni (ai diversi livelli di probabilità di non superamento) e di quelle da esse derivate, si possono dedurre delle interessanti

vate, si possono dedurre delle interessanti informazioni, al di là del significato intrinseco dei dati in esse presenti, circa le differenze e le similitudini, più o meno marcate, esistenti fra l'area di studio e quelle in cui ricadono le stazioni.
Attraverso tale percorso interpretativo, si potranno pertanto ricavare delle indicazioni utili su quali potranno (o dovranno) essere le stazioni oggetto degli approfondimenti di analisi, dal momento che solo a livello di singolo sito di rilevamento sono disponibili tutte le informazioni statistiche approfondite, discendenti dallo studio probabilistico a livello giornaliero, mensile e annuale.

Aspetti Applicativi

CARTE DI TEMPERATURA

Carta delle temperature medie annue.

Tale carta, ancorché di tipo generale, fornisce già una buona idea sulla diversificazione climatica della nostra regione. La media annua infatti, pur essendo un indice sintetico, riesce a discriminare le diverse aree territoriali e trova alcune possibilità applicative anche in agricoltura, qualora siano disponibili, delle indicazioni sulle esigenze termiche generali delle diverse specie e varietà vegetali coltivate.
Tuttavia, a parte la possibilità di un uso diretto dei dati in essa presenti, per gli scopi che richiedono solo un livello minimo di approfondimento, essa, attraverso un criterio di similitudine, può soprattutto servire bene come base per la scelta delle stazioni meteorologiche che meglio rappresentano l’area di interesse di ciascun utente. Per esse sono infatti disponibili, a livello puntuale, tutte le elaborazioni statistiche di approfondimento, presentati in forma grafica e tabellare, consultabili nella sezione Elaborazioni per stazione.

Carte delle temperature medie mensili.

Oltre a quanto ora detto per le temperature medie annue, le carte mensili consentono un livello di analisi molto più dettagliato nel tempo e il confronto, a scansione mensile, con l’andamento meteorologico corrente, che può risultare di grande utilità per conoscere l’entità dello scostamento dai valori climatici e le eventuali conseguenze sulle attività agricole e umane in genere. Le possibilità applicative in agricoltura diventano inoltre maggiori, qualora si confrontino ad esempio con le esigenze termiche delle diverse colture, a livello mensile.
Si tratta ovviamente di informazioni a carattere generale anche in questo caso, come peraltro già detto per le medie annue. Tuttavia, la definizione del potenziale termico dei diversi ambienti riesce a fornire alcune indicazioni operative. In assenza di maggiori dettagli conoscitivi, possibili certamente attraverso lo studio sui dati giornalieri, lo studio su base mensile può comunque costituire una prima base applicativa di un certo interesse.

Carte delle temperature medie delle massime nel mese più caldo e delle minime nel mese più freddo, carta delle escursioni termiche medie annue.

In tal caso è già evidente un maggiore livello di approfondimento sulle differenze climatiche esistenti tra le diverse aree territoriali, in relazione agli effetti che alcune caratteristiche geografiche e topografiche esercitano sull’estrinsecazione dei valori termici giornalieri (temperature massime e minime diurne).
Anche in tal caso, oltre all’uso diretto delle informazioni presenti nella carta, un’utilità maggiore può derivare dalla possibilità di applicare il criterio della similitudine già accennato.

Carte delle sommatorie gradi giorno in base 10 °C.

Tali elaborazioni possono risultare di grande utilità per molte applicazioni agroclimatologiche. La distinzione delle diverse aree territoriali regionali, sulla base del diverso accumulo di gradi di temperatura utili per lo sviluppo e la crescita delle colture, e delle piante in genere, può ad esempio trovare un'interessante applicazione nella discriminazione delle porzioni di territorio più vocate alla produzione agrumicola (arancio in particolare), anche attraverso un anticipo nel raggiungimento di determinati valori di sommatoria GG, rispetto ad altre zone.
Analogamente, tale esempio può essere applicato per evidenziare a livello territoriale le situazioni di diversa precocità di raggiungimento di prefissati e noti valori di gradi giorno cumulati, rispetto ad altre fasi di sviluppo e/o ad altre colture: epoca di raccolta di cereali a ciclo autunno-vernino o primaverile-estivo, epoca di raccolta di olivo, vite e fruttiferi, fasi di sviluppo di insetti fitofagi e/o utili, ecc.
E' comunque ancora una volta opportuno evidenziare che la scala di elaborazione è quella 1:250000, con tutte le considerazioni del caso, circa le diverse applicazioni possibili.

CARTE DELLE PRECIPITAZIONI

Carta delle precipitazioni medie annue.

Per precipitazioni medie si intendono nel nostro caso i valori mediani (50° percentile) dei totali annui delle precipitazioni.
Per quanto si tratti di una carta di tipo generale, essa dà già la possibilità di una buona conoscenza delle caratteristiche pluviometriche delle diverse aree, soprattutto se a essa si affiancano i grafici che schematizzano la distribuzione mensile della stessa variabile.
La conoscenza di questi dati e la possibilità di confrontarli, ad esempio, con quelli dell'evapotraspirazione potenziale può consentire delle utili applicazioni nel campo della programmazione generale dell'irrigazione, in relazione alle esigenze idriche delle diverse colture.
Anche in tal caso peraltro, così come per le temperature, vale bene il criterio della similitudine già più volte richamato. Pertanto, per le aree che presentano analoghe caratteristiche pluviometriche, risulta più agevole la scelta delle stazioni limitrofe più rappresentative rispetto alle esigenze dell'utente. Attraverso tale percorso, sarà quindi possibile accedere successivamente alle analisi probabilistiche realizzate a livello puntuale (di singolo sito di rilevazione). Ciò appare peraltro ancora più valido, qualora si consideri che la distribuzione mensile delle precipitazioni annue risulta in Sicilia raggruppabile in sole tre tipologie,

poco diverse tra loro e tutte comunque riconducibili al tipico clima mediterraneo.

Carte di elaborazione probabilistica delle precipitazioni totali annue.
Oltre alla carta ora detta, sono state effettuate delle elaborazioni cartografiche sulla base dello studio probabilistico delle precipitazioni totali annue. Si tratta in tal caso di un notevole arricchimento dell'informazione di tipo pluviometrico, che consente di conoscere l'entità delle precipitazioni annue a diversi livelli di non superamento, secondo il significato già visto prima, nella parte metodologica. In pratica, la conoscenza di tali dati ci permette di sapere con quale probabilità si possono verificare determinati valori pluviometrici a livello mensile e ci fornisce quindi un maggiore dettaglio nel confronto con le esigenze delle colture, definendone la percentuale di rischio sul mancato soddisfacimento .

CARTE DI EVAPOTRASPIRAZIONE POTENZIALE
L'applicazione dei risultati di questa elaborazione risulta utile per conoscere le potenziali perdite evapotraspirative che caratterizzano le diverse aree territoriali della nostra regione, sia a livello annuo che di singolo mese. Nel primo caso l'utilità principale consiste, ad esempio, nella possibilità di valutare i diversi ambienti, in relazione ai fabbisogni annui di acqua irrigua e consente quindi di definire le caratteristiche progettuali delle strutture di raccolta e degli impianti di distribuzione della stessa.
Le carte mensili, invece, oltre a consentire un maggiore dettaglio per gli stessi scopi ora detti, permette di definire più correttamente i parametri che caratterizzano la distribuzione dell'acqua nel corso della stagione irrigua, sia a livello aziendale che a livello consortile. In quest'ultimo caso i vantaggi appaiono peraltro ben superiori, se si pensi alle dimensioni del fenomeno, inquadrato, appunto, secondo un approccio di tipo comprensiorale, cioè in termini di interi bacini di utenza irrigua.
E' bene sottolineare ancora una volta che trattandosi di informazioni climatiche, e quindi medie, le carte ci danno la possibilità di conoscere la situazione che *normalmente* si verifica in una zona, e quindi trovano possibilità applicative nelle fasi di stima, pertanto a priori, dei fenomeni studiati.
Riguardo agli aspetti gestionali lungo la stagione corrente, l'utente, pur potendo trarre delle buone informazioni di massima dalle carte dell'ETP media annua, dovrà comunque valutare la situazione del presente (dato meteorologico), con altri strumenti operativi (modelli di bilancio idrico), che consentono un ulteriore affinamento della tecnica irrigua, anche attraverso eventuali confronti con il dato climatico presente nella carte stesse.
Per gli ulteriori eventuali approfondimenti di tipo probabilistico, si potranno tuttavia consultare le tabelle e i grafici realizzati per le singole stazioni di rilevazione, anch'essi presenti nell'Atlante. Il principio è sempre quello della similitudine, fra le caratteristiche medie delle stazioni di rilevamento più prossime alla nostra area di studio e quelle dell'area stessa, definite dai valori distribuiti sul territorio (carte tematiche).

CARTE DEGLI INDICI CLIMATICI
Le carte ottenute sono relative a cinque diverse classificazioni climatiche, proposte negli anni passati da diversi climatologi, geografi e botanici che si sono occupati dell'argomento: Indice pluviometrico di Lang, Indice di aridità di De Martonne, Quoziente pluviometrico di Emberger, Indice globale di umidità di Thornthwaite e Indice bioclimatico di Rivas-Martinez. Di tali classificazioni, i dati relativi prime quattro erano già stati pubblicati a livello puntuale (singola stazione) nei volumi "Climatologia della Sicilia", mentre nell'ultimo caso si tratta di una nuova elaborazione effettuata proprio per questo nuovo lavoro, anche in considerazione delle sempre più frequenti segnalazioni e richieste da parte di molti studiosi e tecnici, che affrontano lo studio sulle conoscenze del territorio in chiave bioclimatica, guardando quindi principalmente alle interazioni fra clima e biosfera, vegetali in particolare.
L'utilità di queste carte, come peraltro dei dati puntuali, consiste nella definizione sintetica delle specificità climatiche delle distinte zone dell'Isola, secondo diversi approcci metodologici messi a punto dai vari Autori nel tempo, che nel nostro caso sono caratterizzati da livelli di complessità crescente, nell'ordine di elencazione visto sopra.
Come già analizzato e descritto in "Climatologia della Sicilia", gli indici di classificazione che, anche sulla base delle nostre conoscenze sul territorio, sembrano interpretare meglio la situazione regionale, sono quelli proposti da De Martonne e da Thornthwaite. La classificazione di Lang appare infatti poco adatta a distinguere le diverse aree dell'Isola, tendendo a classificare verso i climi aridi, mentre all'opposto quella di Emberger tende ad ampliare eccessivamente le classi di clima umido, raggruppando situazioni mesoclimatiche caratterizzate da evidenti diversità.
Interessante appare infine la classificazione proposta da Rivas-Martinez, grazie anche alla ricchezza di informazioni presenti, che discende anche dall'articolazione in numerose classi e sottoclassi. Forse anche per tale ragione, l'Indice sembra rispondere bene circa la capacità di rappresentare la reale situazione locale.
Questa carta permette, grazie agli studi svolti dall'Autore, alcune potenziali applicazioni, in seguito alla possibilità di accostamento di tale classificazione con la distribuzione delle comunità vegetali, secondo i principi della fitosociologia.

Bibliografia

AA.VV., 1996. Linee guida del piano territoriale paesistico regionale. Regione Siciliana, Assessorato dei Beni Culturali, Ambientali e della Pubblica Istruzione, Palermo,.
AA.VV., 1998. Carta climatica del Piemonte. Regione Piemonte, Torino.
Benincasa F., Maracchi G., Rossi P., 1998. Agrometeorologia. Patron, Bologna.
Blasi C., 1994. Fitoclimatologia del Lazio. Regione Lazio, Assessorato Agricoltura, Roma.
Bonini Baraldi A., 1993. Caratterizzazione climatologica del territorio veneto. Regione Veneto, Centro Sperimentale per l'Idrologia e la Meteorologia, Teolo (PD).

Cartabellotta D., Drago A., Lo Bianco B., Lombardo M., 1998. Climatologia della Sicilia. Regione Siciliana, Assessorato Agricoltura e Foreste, Palermo.
Castrignanò A., Stelluti M. Studio della variabilità spaziale mediante la geostatistica. Istituto Sperimentale agronomico, Bari.
Ciavatta C., Vianello G., 1989. Bilancio idrico dei suoli: applicazioni tassonomiche, climatiche e cartografiche. CLUEB, Bologna.
Constantinidis C., 1981. Bonifica ed irrigazione. Edagricole, Bologna.
Drago A., Cartabellotta D., Lo Bianco B., Lombardo M., 2000. Atlante climatologico della Sicilia. Regione Siciliana, Assessorato Agricoltura e Foreste, Palermo.
Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989. An indroduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York.
Leti G., 1983. Statistica descrittiva. Il Mulino, Bologna.
Maracchi G., Pieri M., 1994. Manuale di spazializzazione dei dati agrometeorologici - Manuale Tecnico n.11. Ce.S.I.A.-Accademia dei Georgofili, Firenze.
McCoy J., Johnston K., 2001. Using ArcGIS Spatial Analyst. ESRI, Redlands, CA.
Mennella C., 1973. Il clima d'Italia. F.lli Conte Editori, Napoli.
Pignatti S., 1995. Ecologia Vegetale. UTET, Torino.
Pinna M., 1978. L'atmosfera e il clima. UTET, Torino.
Rosini E., 1988. Introduzione all'agroclimatologia (Parte prima: Le basi della climatologia). E.R.S.A. - Servizio Meteorologico Regionale, Bologna.
Rosini E., 1988. Introduzione all'agroclimatologia (Parte seconda: Richiami di statistica). E.R.S.A. - Servizio Meteorologico Regionale, Bologna.
Spiegel M.R., 1992. Statistica (2a edizione). Collana SCHAUM - ETAS Libri, Milano

Appendice: tabelle, grafici, mappe.

Tab.1 - Coefficienti di correlazione quota-temperatura e gradienti termici verticali stimati per i valori medi mensili.
Tab. 1 *- Elevation-temperature correlation coefficients and estimated vertical thermal laps for monthly average values.*

	Coefficiente di correlazione	Gradiente verticale (°C/100 m quota)
Gennaio	-0,96	-0,7
Febbraio	-0,96	-0,7
Marzo	-0,95	-0,6
Aprile	-0,92	-0,5
Maggio	-0,85	-0,4
Giugno	-0,74	-0,3
Luglio	-0,68	-0,3
Agosto	-0,76	-0,3
Settembre	-0,88	-0,5
Ottobre	-0,92	-0,6
Novembre	-0,95	-0,6
Dicembre	-0,95	-0,7
Medie annua	-0,93	-0,5
Massime mese più caldo	-0,35	-0,2
Minime mese più freddo	-0,93	-0,7

Tab. 2 - Coefficienti di correlazione quota-temperatura e gradienti termici verticali stimati per i valori massimi e minimi mensili.
Tab. 2 *- Elevation-temperature correlation coefficients and estimated vertical thermal laps for monthly maximum and minimum values.*

MESE	Tmax		Tmin	
	Coefficiente di correlazione	Gradiente verticale (°C/100 m quota)	Coefficiente di correlazione	Gradiente verticale (°C/100 m quota)
Gennaio	0,93	-0,72	0,92	-0,67
Febbraio	0,92	-0,69	0,93	-0,67
Marzo	0,88	-0,60	0,93	-0,62
Aprile	0,80	-0,50	0,92	-0,57
Maggio	0,61	-0,34	0,84	-0,47
Giugno	0,35	-0,19	0,80	-0,46
Luglio	0,31	-0,19	0,75	-0,42
Agosto	0,36	-0,20	0,76	-0,47
Settembre	0,64	-0,34	0,85	-0,56
Ottobre	0,82	-0,51	0,90	-0,63
Novembre	0,91	-0,64	0,90	-0,66
Dicembre	0,92	-0,70	0,91	-0,66

Tab.3 - Coefficienti di correlazione quota-temperatura e gradienti termici verticali stimati per i valori medi decadici.
Tab. 3 *- Elevation-temperature correlation coefficients and estimated vertical thermal laps for ten days average values.*

DECADE	Coefficiente di correlazione	Gradiente verticale (°C/100 m quota)
01-I	0,94	-0,69
01-II	0,95	-0,69
01-III	0,95	-0,70
02-I	0,95	-0,65
02-II	0,96	-0,73
02-III	0,99	-0,69
03-I	0,95	-0,65
03-II	0,93	-0,63
03-III	0,91	-0,57
04-I	0,91	-0,58
04-II	0,92	-0,60
04-III	0,88	-0,51
05-I	0,87	-0,47
05-II	0,82	-0,40
05-III	0,74	-0,33
06-I	0,75	-0,34
06-II	0,61	-0,28
06-III	0,64	-0,30
07-I	0,64	-0,29
07-II	0,63	-0,28
07-III	0,66	-0,30
08-I	0,56	-0,23
08-II	0,69	-0,34
08-III	0,81	-0,44
09-I	0,87	-0,47
09-II	0,85	-0,44
09-III	0,88	-0,51
10-I	0,92	-0,57
10-II	0,9	-0,60
10-III	0,94	-0,65
11-I	0,93	-0,64
11-II	0,93	-0,68
11-III	0,96	-0,68
12-I	0,95	-0,71
12-II	0,95	-0,71
12-III	0,95	-0,71
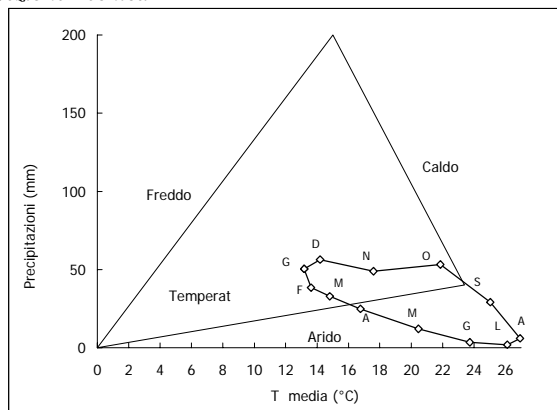
Fig.1 - Climogramma di Peguy per la stazione di Gela (m 45 s.l.m)

Fig.1 *- Peguy climatogram for Gela weather station (m 45 a.s.l)*

Fig. 3 - Elaborazione del bilancio idrico per la stazione di Mineo (m 510 s.l.m)

Fig.3 *- Graphical representation of main Thornthwaite-Mather water balance parameters for Mineo weather station (m 510 a.s.l.)*

	MIN	10°	25°	50°	75°	90°	MAX
Gennaio	0	0	0	0	0	0	0
Febbraio	0	0	0	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0	0	0	0
Aprile	0	0	0	0	0	0	6
Maggio	0	0	0	0	2	10	16
Giugno	0	5	8	12	16	23	30
Luglio	11	16	18	25	29	31	31
Agosto	10	14	16	23	29	31	31
Settembre	0	1	2	7	12	22	26
Ottobre	0	0	0	0	1	6	12
Novembre	0	0	0	0	0	0	0
Dicembre	0	0	0	0	0	0	0
Anno	32	41	49	73	83	117	146

Giorni 204 con assenza di rischio al 90% di probabilità
Dal 19 ottobre al 31 dicembre e dal 1 gennaio al 12 maggio
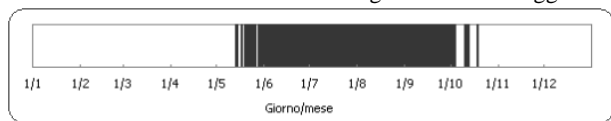
Fig. 5 - Elaborazione probabilistica (metodo dei percentili) del numero mensile di giorni con temperatura massima maggiore o uguale a 30 °C per la staz. di Mineo (m 510 s.l.m)

Fig. 5 *- Probabilistic calculation (percentile method) of monthly number of days with maximum temperature equal or above 30 °C, for Mineo weather staion (m 510 a.s.l.)*

Fig. 2 - Climogramma di Peguy per la staz. di Floresta (m 1250 s.l.m)

Fig. 2 *- Peguy climatogram for Floresta weather station (m 1250 a.s.l)*

Fig.4 - Elaborazione del bilancio idrico per la stazione di Floresta (m 1250 s.l.m)

Fig. 4 *- Graphical representation of main Thornthwaite-Mather water balance parameters for Floresta weather station (m 1250 a.s.l.)*

	MIN	**10°**	**25°**	**50°**	**75°**	**90°**	**MAX**
Gennaio	0	2	6	13	19	24	27
Febbraio	0	6	8	14	17	20	25
Marzo	0	0	3	8	13	19	22
Aprile	0	0	0	1	4	8	19
Maggio	0	0	0	0	0	0	3
Giugno	0	0	0	0	0	0	0
Luglio	0	0	0	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0	0	0	0
Settembre	0	0	0	0	0	0	0
Ottobre	0	0	0	0	0	1	15
Novembre	0	0	0	1	3	5	20
Dicembre	0	0	1	5	10	17	31
Anno	0	23	33	45	56	80	120

Giorni 148 con assenza di rischio al 99% di probabilità
Dal 9 maggio a 4 ottobre
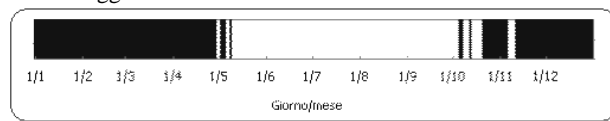
Fig. 6 - Elaborazione probabilistica (metodo dei percentili) del numero mensile di giorni con temperatura minima minore o uguale a 0 °C per la stazione di Floresta (m 1250 s.l.m)

Fig. 6 *- Probabilistic calculation (percentile method) of monthly number of days with minimum temperature equal or below 0 °C, for Floresta weather staion (m 1250 a.s.l.)*
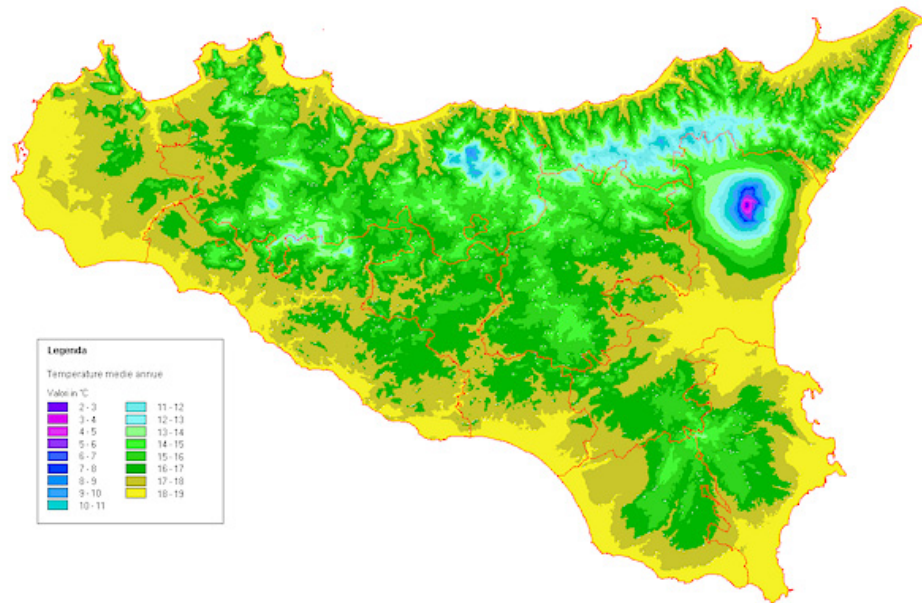
Fig. 7 - Carta delle temperature medie annue
Fig. 7 *-Yearly average tempera ture map*
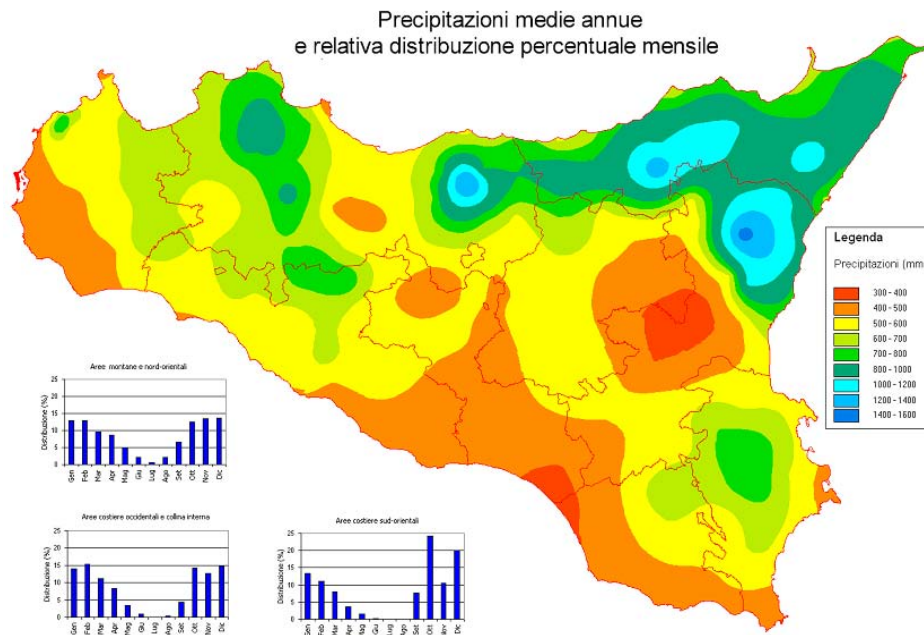
Fig. 8 - Carta delle precipitazioni medie annue
Fig. 8 - *Yearly average (median) precipitation map*
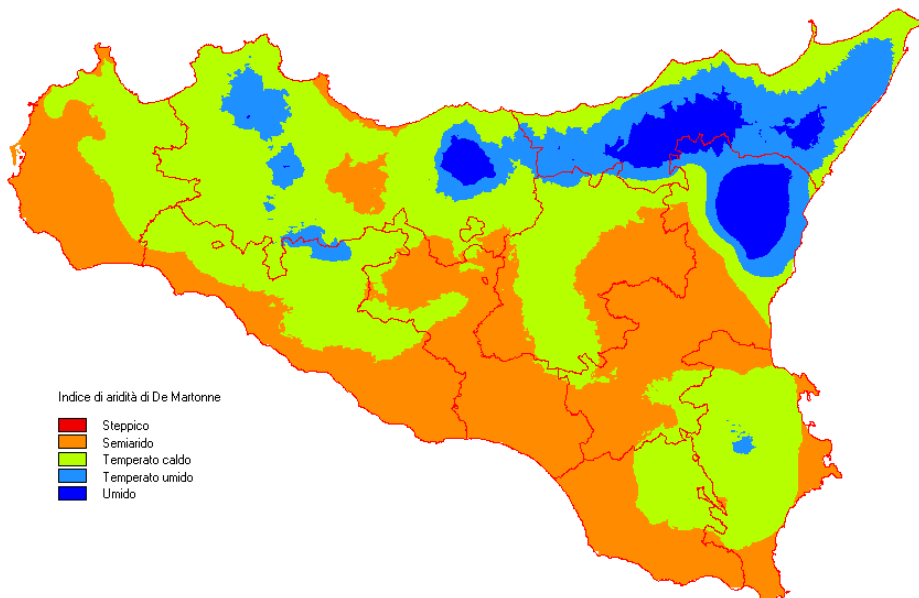
Fig. 9 - Carta dell'Indice di aridità di De Martonne
Fig. 9 - *De Martonne aridity Index map.*

AIAM NEWS

NOTIZIE DALL'ASSOCIAZIONE

AGROMETEOROLOGIA, RISORSE NATURALI E SISTEMI DI GESTIONE DEL TERRITORIO

Vasto-Caramanico Terme,3-5 maggio 2005: breve resoconto dell'ottavo convegno nazionale di agrometeorologia

L.Mariani
luigi.mariani@unimi.it

Da otto anni a questa parte l'AIAM ha il fulcro della propria attività annuale in un convegno dedicato ad un tema di interesse per gli specialisti della materia e per gli altri professionisti dell'ecosistema agricolo-forestale.

Il convegno di quest'anno si è tenuto in Abruzzo ed è stato dedicato al tema "Agrometeorologia, risorse naturali e sistemi di gestione del territorio".

La tre sessioni in cui era strutturato l'incontro sono state le seguenti:

- riduzione dell'impatto ambientale
- classificazione del territorio e sistemi informativi territoriali
- aree protette.

Ad ottimi livelli si è mantenuta l'organizzazione, curata dai colleghi agrometeorologi dell'Agenzia Regionale di Sviluppo Agricolo dell' Abruzzo e lusinghiera è stata la partecipazione di pubblico (circa 140 persone).

Aldilà della cornice organizzativa il convegno si è rivelato assai ricco di contributi tecnici e scientifici che hanno spaziato sui più diversi ambiti della ricerca e delle applicazioni in agrometeorologia.

Un successo si è rivelata pure la sessione dedicata ai Parchi ed alle aree protette che ha avuto luogo a Caramanico Terme, località amena e ricca di testimonianze storiche.

Come associazione non possiamo che ringraziare l'Arssa ed in particolare i colleghi del centro agrometeorologico regionale di Scerni che fin dalla fondazione dell'associazione partecipano con entusiasmo alle attività dell'Aiam.

In tal senso dev'essere interpretata la lettera sottoriportata inviata a Donato de Falcis, che per molti anni ha diretto il servizio agrometeorologico provinciale di Piacenza

Egr. Dott.
Donatantonio De Falcis
Direttore generale
dell'ARSSA

Caro Donato,
a conclusione del convegno nazionale di agrometeorologia "AGROMETEOROLOGIA, RISORSE NATURALI E SISTEMI DI GESTIONE DEL TERRITORIO", tenutosi a Vasto e Caramanico dal 3 al 5 maggio scorsi, desidero comunicarti che i soci dell'AIAM hanno apprezzato moltissimo l'iniziativa, rivelatasi ricca di contenuti tecnico – scientifici e resa oltremodo gradevole per la cornice paesaggistica e storica in cui si è svolta.
Penso che il successo del convegno sia dipeso in misura determinante dall' impegno profuso dalla tua Agenzia e di ciò desidero rendere merito a te ed ai tuoi collaboratori.
Sperando in futuro di poter contraccambiare la cortesia e l'ospitalità, ti invio i miei più cordiali saluti.

Il presidente dell'AIAM
Luigi Mariani

ASSEGNATO IL PREMIO DI STUDIO PER TESI DI LAUREA IN AGROMETEOROLOGIA EDIZIONE 2005

Il premio, consegnato durante il convegno annuale dell'associazione, è stato quest'anno attribuito a Mariangela Sandra per la tesi di laurea **Stima dei tempi di bagnatura fogliare utilizzando dati radar e loro possibilità applicative** - Università degli Studi di Udine, Facoltà di Agraria, Corso di Laurea in Scienze e Tecnologie Agrarie – Relatore prof. Romano Giovanardi, Correlatori prof. Francesco Danuso e dott. Andrea Cicogna.

La motivazione è stata la seguente: *originale lavoro di ricerca che propone l'integrazione di tecnologie tradizionali ed innovative per la misura ed il trattamento di grandezze fisiche e biologiche giungendo a definire un' applicazione agrometeorologica di tipo operativo con possibili, significative ricadute tecnico-economiche a livello aziendale e territoriale.*

La commissione di valutazione ha constatato il buon livello complessivo dei lavori valutati qui di seguito elencati.

Tesi di laurea del dott. Davide Sandrin: Influenza di un sistema di difesa dalle gelate sulla temperatura dell'aria a contatto con la vegetazione - Università degli Studi di Udine.
Tesi di laurea dell'Ing. Alessandro Ferrari: Caratterizzazione climatologica della costa occidentale del Lago di Garda per la gestione ottimale di coltivazioni di limoni - Università degli Studi di Trento.
Tesi di laurea della d.ssa Alexandra Rosenmund: Valutazione del modello di simulazione EUROSEM per la stima dell'erosione nella collina marchigiana - Università degli Studi di Milano.
Tesi di laurea della d.ssa Alice Colombo: Maturità fenolica delle uve ed evoluzione del quadro polifenolico nel vino in Valtellina - Università degli Studi di Milano.
Tesi di laurea del dott. Mattia Romani: Analisi di parametri fisici di interesse meteorologico mediante il modello LSPM sul territorio europeo - Università degli Studi di Torino.
Tesi di laurea dell'Ing. Marco Sitta: Misure di Flussi Turbolenti in Atmosfera per lo Studio di Gelate Tardive - Università degli Studi di Trento.

ANALISI DATI ED ELEMENTI DI PROGRAMMAZIONE

A. Cicogna
andrea.cicogna@csa.fvg.it

Forte della buona esperienza delle passate edizioni l'AIAM, in collaborazione con l'UCEA–CRA, presenta la quarta edizione del corso: Analisi dati ed elementi di programmazione.
Questa proposta si rivolge ad agro e bio-meteorologi (ma non solo) che vogliono affacciarsi al mondo della programmazione
Il corso si terrà tra il 29 novembre e il 2 dicembre 2005 presso l'Ucea - Via del Caravita 7/A – Roma e sarà strutturato nei seguenti moduli:

1. approccio algoritmico all'analisi dei dati agrometeorologici - docente: Luigi Mariani
2. analisi di dati con il linguaggio Visual Basic per Excel - docente: Andrea Cicogna
3. analisi di dati con il linguaggio Visual Basic per Excel - docente: Vittorio Marletto
4. analisi di dati con il linguaggio R - docente: Giambattista Toller

Il corso sarà articolato su 4 giorni con 18 ore di lezione e 12 ore di esercitazioni, per un totale di 30 ore, corrispondenti a 3 crediti universitari.
Il costo complessivo è di 300,00 € a persona ed è comprensivo del materiale didattico.
Chi fosse interessato può contattare la Segreteria del Corso (Andrea Cicogna)

IL CONVEGNO AIAM 2007 IN PIEMONTE

A.Cicogna
andrea.cicogna@csa.fvg.it

Il prossimo anno il convegno dell' Aiam si terrà in Piemonte (Torino ma non solo) indicativamente tra il 6 e 8 giugno .
Titolo del convegno: Agrometeorologia e Gestione delle colture agrarie
Il convegno si articolerà in tre sessioni:

- difesa
- altre agrotecniche
- viticoltura di qualità

L'organizzazione sarà curata dal collega Federico Spanna del Servizio Fitosanitario della regione Piemonte.
Nel prossimo numero di questa rivista forniremo ulteriori dettagli sull' iniziativa.

CLIMATIC ANALYSIS AND MAPPING FOR AGRICULTURE

F.Rossi
f.rossi@ibimet.cnr.it

Dal 14 al 17 giugno si è tenuto a Bologna il workshop internazionale patrocinato da WMO, FAO, European Science Foundation e da CNR e dedicato al tema "CLIMATIC ANALYSIS AND MAPPING FOR AGRICULTURE". Il workshop ha visto la presentazione di 36 lavori originali inquadrati in
sette sessioni ed ha visto inoltre l'attività di tre commissioni che hanno redatto documenti di sintesi sulle seguenti tematiche:

1. adeguatezza di dati ed informazioni
2. metodi di zonazione agroclimatica e tecniche per la gestione sostenibile dei territori agricoli
3. limitazioni e debolezze nell'innovazione delle tecniche operative a livello nazionale e regionale.

L'iniziativa, organizzata da CNR-IBIMET di Bologna nell'ambito delle attività OPAG del WMO e dell' iniziativa COST718 (Meteorological Applications in Agriculture), ha avuto un considerevole successo di partecipazione, con lavori presentati da agrometeorologi provenienti da oltre 20 Paesi del mondo, Australia, Corea, Zimbabwe compresi.
Questo meeting ha avuto alla base delle proprie motivazioni il concetto di agricoltura sostenibile, concetto ecologico, economico e sociale sul quale un corretto utilizzo delle risorse climatiche e atmosferiche gioca un ruolo di importanza primaria.
Per poter effettuare scelte operative, e per poter effettuare valutazioni di qualità occorre che la Ricerca e i Servizi utilizzino mezzi e tecnologie appropriati a questi scopi mantenendosi costantemente aggiornati sull'evoluzione di queste tecnologie. La mappatura agroclimatica e la zonazione sono mezzi di notevole importanza per l'uso sostenibile del suolo, la conservazione della biodiversità e la valutazione del potenziale specifico di diverse realtà agricole e la loro utilizzazione ottimale richiede lo sforzo combinato di diverse discipline, dall'ecofisiologia alla agronomia, dalla meteorologia alla fisica dell'atmosfera, con uno spettro di tecniche che si sono enormemente sviluppate nelle ultime decadi.

Certo l'agrometeorologia è all'intersezione di queste discipline e può giocare un ruolo unificante e determinante nel promuovere conoscenze di base, applicazioni e progetti a livello regionale e nazionale, volti a promuovere un efficiente uso delle risorse, tenendo conto delle limitazioni e dei punti di debolezza delle informazioni a livello locale. Durante i lavori del workshop, si sono valutate le possibilità di utilizzo combinato di nuove tecnologie, come il remote sensing, i GIS, la modellistica nel generare mappe agroclimatiche, comprendendo anche aspetti di vulnerabilità delle colture alla variabilità del clima e di determinazione del rischio.
I proceeding del Workshop verranno pubblicati e largamente distribuiti all'inizio del prossimo anno

Guide for Authors

Manuscripts should refer to original researches, not yet published except in strictly preliminary form.
For each published article, 25 reprints (the cost of a single reprint is € 2.20) must be bought and at least one Author must be member of the Italian Society of AgroMeteorology (AIAM).

Manuscripts submission
Manuscripts should be submitted (in .doc or, preferably, .pdf format) by e-mail to:
Roberto Confalonieri
Joint Research Centre of the European Commission
roberto.confalonieri@jrc.it
Tel. +39-0332-789872
The submission of a manuscript implies that all the co-Authors have read and approved it.

Once accepted, files should be prepared in .doc or .pdf format for the text and .jpg or .bmp for pictures.

Preparation of the manuscripts
Manuscripts can be written in English or Italian.
For manuscripts preparation, the following order should be followed:
- **Title** (short titles, although explicative, are preferred)
- **Author**(s)
- **Affiliation**(s) and addresses of all the co-Authors are required. The Corresponding Author must be clearly indicated. For the Corresponding Author, also mail address, telephone and fax numbers must be provided.
- **Abstract** (not longer than 400 words)
- **Keywords** (usually between 3 and 6. Do not include words already present in the title)
- **Introduction**
- **Materials and methods**
- **Results**
- **Discussion**
- **Conclusions**
- **Acknowledgements**
- **Appendix**
- **References**
- **Tables** (preceded by relative captions)
- **Figures** (preceded by relative captions)

Paragraphs “Results” and “Discussion” can be unified, like paragraphs “Discussion” and “Conclusions”.
Paragraphs “Acknowledgments” and “Appendix” are optional.
Text must be written with left alignment and on one column.
Do not use links between different components of the manuscript.
Limit the use of sub-paragraphs (inside the paragraphs indicated above) to the case where they are considered strictly necessary.
The text must be doubled spaced and wide margins are required to facilitate the review process.
All pages and lines must be numbered (line numbers must restart for each page). It is not necessary to number the paragraphs.

Proofs of the paper (formatted according to the Journal style) will be sent to the Corresponding Author for proof reading.

Tables
Use only black for tables (both for table words and figures and for table lines).
Tables can be sent as tab (or space) delimited text or, preferably, on spreadsheets.
While formatting the tables, consider that only horizontal lines will be present in the published version.
Tables must be self-explanatory: table captions must contain all the information necessary to understand the table itself. Explicative notes (e.g. for acronyms) can be present below the table.
Tables must be numbered according to the order they appear in the text.
All tables must be cited in the text.

Figures
Figures should be only in black/white or greyscale. If colour figures are considered strictly necessary, the cost for each colour figure is 50 euros.
Figures must be self-explanatory: all the information contained in the figure and in the relative caption must allow a complete understanding of the figure itself.
Figures must be numbered according to the order they appear in the text.
All figures must be cited in the text.
The presence of words on the pictures must be limited to the case where they are strictly necessary.

Figure size could be reduced up to 50 % of the original size. Consider that while you are preparing them.

References
All the references in the text must be reported in the “References” section and vice-versa.
In the text, only the Author(s) surname must be present, without the name or the first letter of the name (e.g. “Asimov, 2005” and not “Isaac Asimov, 2005” or “I. Asimov, 2005”).
If two authors are present, refer to them as: “Asimov and Seldon, 2005” in the text (do not use “&” between the surnames).
If more than two Authors are present, refer to them as: “Asimov et al., 2005” in the text. Do not follow this instruction in the “Reference” paragraph: in that case, all the Authors must be listed.
If more than one article must be cited in the same point, rank them chronologically (from the less recent to the more recent).
In the section “Reference”, articles must be cited following alphabetic order (first letter of the first Author’s surname).
If the Author (e.g. Asimov) of an article is present with co-Authors in other articles, use the following rank criterion: (i) articles where Asimov is the only Author, (ii) articles where Asimov is present with only one co-Author, (iii) the others. If the same Author(s) is present in the “References” section more than one time for the same year, use letters (e.g. “a” or “b”) after the publication year.
For journals, references must be in the following form:
Asimov, I., Seldon, H., 2005. Title. Journal name, number, pages.
For conference proceedings:
Asimov, I., Seldon, H., 2005. Title. Proceedings of the “conference name”, conference location, conference start and ending date, pages.
For books:
Asimov, I., Seldon, H., 2005. Book title. Publisher, publishing location, pages.
For books with different chapters written by different Authors:
Asimov, I., Seldon, H., 2005. Chapter title. In: Baley, E. (Ed.), book title. Publisher, publishing location, pages.

Manuscripts “in press” can be cited.
Posters or oral presentation can not be cited if they are not published on the relative proceedings.

Guida per gli Autori

I manoscritti inviati devono riferirsi a materiale originale, non pubblicato altrove, se non in fase strettamente preliminare.
Un autore per ogni pubblicazione dovrà impegnasi ad acquistare 25 reprint (costo del reprint € 2.20). Almeno uno degli autori, per ogni pubblicazione, dovrà essere socio dell'AIAM.

Invio dei manoscritti
I manoscritti devono essere inviati (i) in formato cartaceo (2 copie) e (ii) via E-mail a:
Roberto Confalonieri
European Commission- Joint Research Centre - Institute for the Protection and Security of the Citizen Agriculture & Fisheries Unit
Via Fermi, 1 21020 Ispra (VA) - Italy
e- mail roberto.confalonieri@jrc.it
tel. +39 0332 789872 fax+39 0332 789029
L'invio dei manoscritti presuppone l'approvazione degli stessi da parte di tutti gli Autori. I manoscritti accettati per la pubblicazione devono essere spediti esclusivamente su supporto magnetico o via E-mail. I file possono essere spediti su floppy disk, su ZIP disk o su CD ROM. I file possono essere in formato .doc, .rtf per quanto riguarda il testo, .jpg per quanto riguarda le figure.

Preparazione dei manoscritti
Gli articoli possono essere in Italiano o in Inglese. Per la stesura del manoscritto seguire l'ordine:

- **Titolo** evitare titoli troppo lunghi1. Ad esempio nel caso di un articolo che parla delle relazioni esistenti fra la circolazione a scala sinottica e le migrazioni dei lepidotteri nottuidi è preferibile il titolo "*Circolazione sul Mediterraneo e migrazioni stagionali dei lepidotteri nottuidi*" al titolo "*Analisi delle strutture circolatorie a scala sinottica sull'area del Mediterraneo e dei relativi effetti sulle migrazioni stagionali dei lepidotteri nottuidi*" Nel caso l'articolo sia in lingua italiana dovrà essere inviata anche una versione del titolo in lingua inglese; il contrario si avrà nel caso di articolo in lingua inglese)
- **Autori**
- **Indirizzo** completo degli Autori ed ente di appartenenza (includere i numeri di telefono, di fax e l'indirizzo di posta elettronica; indicare chiaramente l'Autore di riferimento per la corrispondenza con l'Editor)
- **Riassunto** (non deve superare le 400 parole. Nel caso l'articolo sia in lingua italiana dovrà essere inviata anche una versione del riassunto in lingua inglese; il contrario si avrà nel caso di articolo in lingua inglese)
- **Parole chiave** (normalmente da 3 a 6; escludere le parole già incluse nel titolo. Nel caso l'articolo sia in lingua italiana dovrà essere inviata anche una versione delle parole chiave in lingua inglese; il contrario si avrà nel caso di articolo in lingua inglese)

- **Introduzione,**
- **Materiali e Metodi**
- **Risultati**
- **Discussione**
- **Conclusioni**
- **Ringraziamenti**
- **Appendice**
- **Bibliografia**
- **Tabelle** (precedute dalla didascalia)
- **Figure** (precedute dalla didascalia)

Nel caso l'articolo sia in lingua italiana dovrà essere inviata anche una versione delle didascalie in lingua inglese; il contrario si avrà nel caso di articolo in lingua inglese. In alternativa i paragrafi "Risultati" e "Discussione" possono essere accorpati, come anche i paragrafi "Discussione" e Conclusioni". I paragrafi "Ringraziamenti" e "Appendice" sono facoltativi. Utilizzare sempre l'allineamento a sinistra e non scrivere su due o più colonne. Non utilizzare collegamenti tra varie parti del testo. Limitare l'uso di sottoparagrafi all'interno di quelli sopra elencati solo ai casi in cui questi siano strettamente necessari. Utilizzare interlinea doppia e lasciare ampi margini (a destra, a sinistra, sopra e sotto). Numerare tutte le pagine e le righe in ogni pagina. Non numerare i paragrafi.
Una versione definitiva ed impaginata degli articoli pronti per la pubblicazione sarà inviata agli Autori per la segnalazione di eventuali errori verificatisi nel processo di editing e/o di eventuali correzioni.

Tabelle
Le tabelle devono essere in bianco e nero. Le tabelle possono essere inviate anche su file di testo o, preferibilmente, su foglio elettronico excel.
Tenere presente che la tabella avrà, una volta pubblicata, solo le righe (di delimitazione tra campi) orizzontali.
Le tabelle devono essere autoesplicative nel senso che la relativa didascalia dovrà essere in grado di fornire tutte le spiegazioni necessarie alla comprensione dei contenuti della tabella stessa. In aggiunta possono essere presenti note che compariranno a fondo tabella. Le tabelle devono essere numerate in accordo all'ordine con il quale sono citate nel testo. Tutte le tabelle devono essere citate nel testo.

Figure
Le figure devono essere in bianco e nero. La stampa di figure a colori comporta un costo a carico degli Autori di € 50 per pagina a colori. Le figure devono essere autoesplicative nel senso che la relativa didascalia dovrà essere in grado di fornire tutte le spiegazioni necessarie alla comprensione dei contenuti della figura. Le figure devono essere numerate in accordo all'ordine con il quale sono citate nel testo.
Tutte le figure devono essere citate nel testo.Si prega infine di limitare al minimo la presenza di scritte sulle immagini.
Tenere ben presente che le figure, al momento dell'impaginazione, potranno essere ridotte fino al 50% delle loro dimensioni originali e che, anche in questo caso, dovranno conservare una perfetta leggibilità.

Riferimenti bibliografici
Tutti i riferimenti citati nel testo devono essere riportati nel paragrafo "Bibliografia" e tutti i riferimenti presenti in "Bibliografia" devono essere citati nel testo.
Nel testo i cognomi degli Autori devono essere citati senza il nome e senza l'iniziale (es: *Paperino, 2003* e non *Paolino Paperino, 2003* e nemmeno *P. Paperino, 2003*).
Se nel testo viene citato un lavoro di due Autori, utilizzare la notazione "Paperone e Paperino, 2003" (non utilizzare "and" o "&" tra i due nomi).
Se nel testo viene citato un lavoro con più di due Autori, utilizzare la notazione "Paperone *et al.*, 2003". Si raccomanda inoltre di non utilizzare questa notazione nel paragrafo "Bibliografia": in questo caso tutti gli Autori devono infatti essere elencati.
Nel caso nel testo si faccia riferimento a più lavori nello stesso punto, questi dovranno essere elencati in ordine cronologico, dal meno recente al più recente (esempio; *Paperone, 2002; Paperino, 2004*).
Nel paragrafo "Bibliografia" i riferimenti sono da citare in ordine alfabetico (iniziale del cognome del primo Autore).
Nel caso l'Autore di un lavoro compaia con co-Autori in altri lavori, citare prima i lavori nei quali compare come singolo Autore (ordinandoli cronologicamente), poi i lavori in cui compare con un solo co-Autore (ordinandoli cronologicamente) e infine quelli in cui compare con più di un co-Autore (ordinandoli cronologicamente). Per lavori dello stesso Autore(i) pubblicati nello stesso anno, utilizzare la notazione 2003a, 2003b, ecc.
Per le riviste, le citazioni dovranno essere stese come segue:
Bianchi, R., Colombo, B., Ferretti, N., 2003. Titolo dell'articolo. Nome della rivista, numero della rivista, pagine.
Per Atti di Convegni:
Bianchi, R., Colombo, B., Ferretti, N., 2003. Atti del "Nome del Convegno", luogo presso il quale si è tenuto il Convegno, data(e) nelle quali si è tenuto il convegno, pagine.
Per libri:
Bianchi, R., Colombo, B., Ferretti, N., 2003. Titolo del libro. Da chi è stato pubblicato, Luogo presso il quale è avvenuta la pubblicazione.
Per libri con più Autori:
Bianchi, R., Colombo, B., Ferretti, N., 2003. Titolo del capitolo. In: Baudo, P. (Ed.), Titolo del volume. Da chi è stato pubblicato, Luogo presso il quale è avvenuta la pubblicazione, pagine.
Può essere citato materiale "in stampa".
Non sono accettati riferimenti a lavori presentati in occasione di convegni, seminari e simili come poster o comunicazioni orali e non pubblicati nei relativi atti

VAISALA
Reliable.